

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Geologie
Ústav petrologie a strukturní geologie



Bc. Markéta Jirků

**Deformační historie a rozpad ternárních živců v proto-stádiu vývoje
felzických granulitů Blanského lesa**

Deformation history and decomposition of ternary feldspar in the proto-phase of
the Blanský les felsic granulite evolution

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Petr Jeřábek, Ph.D.

Praha, 2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně za pomoci svého školitele a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 20. 8. 2018

.....

Bc. Markéta Jirků

Český abstrakt:

Diplomová práce se zabývá nejstarší rozpoznanou deformační mikrostrukturou felzických granulitů Blanského lesa za účelem pochopení deformační historie těchto hornin v podmínkách spodní kůry, tedy před jejich následnou modifikací během exhumace. Studium mikrostruktur je také zaměřeno na rozpad ternárních živců v proto-stádiu vývoje těchto granulitů. Na základě strukturní a mikrostrukturní analýzy vzorku kliváže I. s méně vyvinutou kliváží a vzorku kliváže II. s více vyvinutou kliváží bylo možné odlišit dvě deformační stavby, kdy S1 je definovaná páskováním a střídáním křemenných pásků s pásy bohatými plagioklasem, granátem a s porfyroklasty alkalických živců. Studie odhalují transpozici do kliváže S2 a také ukazují, že při tomto intenzivním přepracování S1 novou planární strukturou S2 došlo k rozpadání křemenných pásků a k rekrytalizaci do tzv. ribonů. Po provedení živcové termometrie u kliváže I. a II. bylo z výsledků možné rozlišit a za sebou seřadit tři stadia rozpadu živců. Byl zjištěn kontinuální pokles teplot, což reflektují jednotlivé mikrostruktury. Výsledky analýz přednostní tvarové orientace hranic zrn ukazují, že při vzniku původní dvouživcové matrix je vidět přednostní tvarová orientace hranic této matrix. Z analýz provedených u kliváže I. je zřejmé, že tvarové přednostní orientaci dominuje albitový lem, avšak po jeho eliminaci jsou kontakty hranic plagioklasu a draselného živce v nejstarší původní dvouživcové matrix zhruba kolmé na kliváž. U kliváže II. po eliminaci plagioklasového lemu jsou kontakty hranic živců v původní dvouživcové matrix paralelní s kliváží. Křemen v matrix se vyznačuje všesměrnou krystalografickou orientací zrn z důvodu, že se pravděpodobně jedná o intersticiální zrna, která krystalizují z taveniny. Přítomnost taveniny vysvětluje vznik dvouživcové matrix, kdy proces rozpadu živců spouští právě přítomnost této taveniny, která je na kontaktech s porfyroklasty ternárních živců a reaguje s nimi, což způsobuje rozpouštění porfyroklastu ternárního živce a následnou krystalizaci taveniny. Rozpad porfyroklastů ternárního živce na dvouživcovou matrix tedy interpretuji s přítomností taveniny v hornině a za vzniku kliváže ve stejný moment a předpokládám, že tavenina snadno migrovala po hranicích zrn křemene do domén kliváže protínající křemenné pásy a následně pásy přerušovala, díky čemuž mohlo dojít k vytvoření tohoto konkrétního geometrického uspořádání křemenných zrn.

Klíčová slova: felzický granulit; moldanubická oblast; živcová termometrie; kvantitativní mikrostrukturní analýza; difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD); rentgenová tomografie

English abstract:

This diploma thesis deals with the oldest recognized deformation microstructure of felsic granulites of Blanský les (southern Bohemian Massif) in order to understand their lower crustal deformation history later altered during exhumation. Moreover, the study is focused on decomposition of ternary feldspars in the proto-phase of evolution of granulite microstructure. Based on the structural and microstructural analyses of the less developed cleavage I. and the more developed cleavage II., it was possible to distinguish between two deformation structures. The S1 is defined by compositional banding of alternating quartz bands with bands rich in plagioclase, garnets and with porphyroclasts of alkaline feldspars. The S1 cleavage is transposed into the S2 cleavage. During intense reworking of S1 into S2, the quartz bands were decomposed and recrystallized into the ribbons. The feldspar thermometry of the cleavage I. and II. allowed to distinguish the three stages of decomposition of feldspars. A continuous temperature decrease was observed as reflected by the individual microstructures. The quantitative microstructural analysis indicates the shape preferred orientation of the grain boundaries of two-feldspar matrix. The shape preferred orientation of cleavage I. is controlled by the albite rim, however after its elimination the contacts of feldspars boundaries in the oldest original two-feldspar matrix are roughly perpendicular to the cleavage. In case of cleavage II., after elimination albite rim, the contacts of feldspar boundaries in the original two-feldspar matrix are parallel to the cleavage. Quartz in the matrix is characterized by the random crystallographic orientation because it is likely that the interstitial grains crystallized from the melt. The presence of melt may explain the formation of the two-feldspar matrix where the process of decomposition activates the presence of the melt. The melt then reacts with the ternary feldspar porphyroclasts, which causes the decomposition of the ternary feldspar and subsequent crystallization of melt. I interpret, that the decomposition of the ternary feldspar porphyroclasts into the two-feldspar matrix occurred simultaneously during formation of the cleavage and during presence of the melt. It is also assumed that the melt easily migrated along the boundaries of the quartz grains towards the domains of cleavage intersecting the quartz bands, and subsequently interrupted these quartz bands. This may have resulted into such specific quartz grain arrangement.

Key words: felsic granulites; Moldanubian domain; feldspar thermometry; quantitative microstructural analysis; electron backscatter diffraction (EBSD); X-ray tomography

Poděkování:

Předně bych velmi ráda poděkovala mému školiteli doc. RNDr. Petru Jeřábkoví, Ph.D., z Ústavu petrologie a strukturní geologie za jeho vynikající odborné vedení, za to, že si na mě vždy udělal čas, když bylo potřeba, za velkou trpělivost a za korekce, bez kterých by se práce nikdy nedostala do současné podoby.

Velké poděkování patří i dalším lidem z Ústavu petrologie a strukturní geologie, hlavně tedy Mgr. Jakubu Krylovi, který byl velmi ochoten a nápomocen při řezání vzorků a dále Mgr. Martinu Rackovi, Ph.D., za pomoc s elektronovým mikroskopem. Je třeba poděkovat Mgr. Janu Fraňkovi, Ph.D., který pro výzkum poskytnul také některé své vzorky, Mgr. Filipu Tomkovi, Ph.D., za cenné rady a pomoc během finálního upravování práce a Mgr. Prokopu Závadovi, Ph.D., za asistenci při vrtání válečků pro rentgenovou tomografii. Chtěla bych také poděkovat Ing. Ivaně Kumpové z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, která mi pomohla s programem myVGL.

Dále pak velice děkuji své mamince, která mi umožnila toto studium a pomohla hlavně psychickou podporou k dokončení této práce.

Seznam použitých zkratek

Minerály

Plg	plagioklas
Kfs	draselný živec
Grt	granát
Bt	biotit
Ap	apatit
Qz	křemen
Spl	spinel

Ostatní

BSE (Backscattered electrons)	zpětně odražené elektrony
CL (Cathodoluminescence)	katodoluminiscence
Ma	milión let
P-T podmínky	teplotně-tlakové podmínky
HP	vysokotlaký
UHP	ultravysokotlaký
ČM	Český masiv

Obsah

1 Motivace	16
2 Interpretace granulitů Českého masivu v kontextu variské orogeneze	16
2.1 Přehled modelů variského vývoje Českého masivu	17
3 Felzické granulity	21
3.1 Výskyt granulitů v Českém masivu	22
3.2 Moldanubické granulity	22
3.3 Granulity Blanského lesa	24
3.3.1 Pozice v moldanubiku, stáří a asociované horniny	24
3.3.2 Strukturní vývoj a minerální asociace	25
3.3.3 Mikrostrukturní vývoj granulitů	27
3.3.4 Teplotně-tlakové odhady podmínek vzniku a vývoje granulitů	28
4 Metody studia a analytické podmínky studovaných vzorků	32
4.1 Elektronový skenovací mikroskop a elektronová mikrosonda	32
4.2 Digitalizace horninových mikrostruktur pomocí programu QGIS	32
4.3 Kvantitativní analýza mikrostruktur	33
4.4 Difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD)	34
4.5 Rentgenová tomografie	34
5 Charakteristika odebraných vzorků granulitu Blanského lesa	35
5.1 Mikrostruktura a petrografie studovaných vzorků	35
5.1.1 Stádium kliváže I. (YZ, XZ)	35
5.1.2 Stádium kliváže II. (YZ)	38
5.2 Chemická analýza živců	39
5.2.1 Kliváž I.	39
5.2.2 Kliváž II.	46
5.3 Živcová termometrie pro výpočet rovnovážné teploty živců	49
5.3.1 Živcová termometrie – kliváž I.	49

5.3.2 Živcová termometrie – kliváž II.	52
5.3.3 Shrnutí výsledků živcové termometrie pro výpočet rovnovážné teploty živců.....	54
6 Kvantitativní mikrostrukturní analýza.....	55
6.1 Kliváž I. – mapa 1.....	55
6.1.1 Distribuce velikosti zrn v doméně mapy 1	57
6.1.2 Tvarová přednostní orientace jednotlivých minerálních fází (SPO zrn) v doméně mapy 1.....	59
6.1.3 Tvarová přednostní orientace hranic zrn (SPO hranic zrn), síla SPO hranic zrn v doméně mapy 1	59
6.2 Kliváž I. – mapa 3.....	62
6.2.1 Distribuce velikosti zrn v doméně mapy 3	62
6.2.2 Tvarová přednostní orientace jednotlivých minerálních fází (SPO zrn) v doméně mapy 3.....	65
6.2.3 Tvarová přednostní orientace hranic zrn (SPO hranic zrn), síla SPO hranic zrn v doméně mapy 3	65
6.3 Kliváž II. – mapa 2	67
6.3.1 Distribuce velikosti zrn v doméně mapy 2	68
6.3.2 Tvarová přednostní orientace jednotlivých minerálních fází (SPO zrn) v doméně mapy 2.....	71
6.3.3 Tvarová přednostní orientace hranic zrn (SPO hranic zrn), síla SPO hranic zrn v doméně mapy 2	71
7 Difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD).....	73
7.1 Kliváž I. – území domény 2_1	74
7.2 Kliváž I. – území domény 3_1.....	76
7.3 Kliváž I. – území domény 13_1.....	76
7.4 Kliváž II. – území domény 1_1	79
7.4.1 První část domény 1_1.....	79
7.4.2 Druhá část domény 1_1	81

7.5 Kliváž II. – území domény 2	82
7.6 Kliváž I. – území domény 6_3.....	83
8 Rentgenová tomografie.....	85
9 Interpretace a diskuze.....	88
9.1 Interpretace výsledků chemické analýzy živců, živcové termometrie a rozpadu živců .	88
9.1.1 Pravděpodobný teplotní vývoj odmíšení dvouživcové matrix a exolučních lamel .	88
9.1.2 Výsledky chemické analýzy živců a živcové termometrie	89
9.1.3 Porovnání maximálních vypočtených teplot s předchozími P-T odhady	91
9.2 Interpretace výsledků kvantitativní mikrostrukturní analýzy	92
9.2.1 Přednostní orientace minerálních fází (SPO zrn)	92
9.2.2 Přednostní tvarová orientace hranic zrn (SPO hranic zrn) a plagioklasové (albitové) lemy	92
9.3 Interpretace výsledků EBSD.....	94
9.4 Interpretace vzniku destičkových křemenů – vztah tavení, rozpadu živce a deformace se vznikající kliváží.....	94
10 Závěr.....	95
Přílohy	96
Seznam použité literatury.....	103

Seznam tabulek

Tab. 1 Shrnutí odhadů P-T pro HP granulity ČM	23
Tab. 2 Reprezentativní mikrosondové analýzy živců kliváže I. z oblasti 12.....	44
Tab. 3 Reprezentativní mikrosondové analýzy živců kliváže I. z oblasti 13_1	45
Tab. 4 Reprezentativní mikrosondové analýzy živců kliváže II.	48
Tab. 5 Vypočtené rovnovážné teploty zrn draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix kliváže I.....	51
Tab. 6 Vypočtené rovnovážné teploty porfyroklastu pertitu a pertitu v matrix I. kliváže I. ...	52
Tab. 7 Vypočtené rovnovážné teploty zrn draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix kliváže II.	53
Tab. 8 Vypočtené rovnovážné teploty pertitu v matrix I. kliváže II.	54
Tab. 9 Tabulka zobrazující počet jednotlivých digitalizovaných zrn a jejich procentuální podíl v digitalizované mapě 1 kliváže I.....	57
Tab. 10 Tabulka zobrazující EAD měření v μm z hlediska minima, mediánu, maxima a průměrných velikostí jednotlivých minerálních fází v mapě 1 kliváže I.	58
Tab. 11 Tabulka zobrazující počet jednotlivých digitalizovaných zrn a jejich procentuální podíl v digitalizované mapě 3 kliváže I.....	63
Tab. 12 Tabulka zobrazující EAD měření v μm z hlediska minima, mediánu, maxima a průměrných velikostí jednotlivých minerálních fází v mapě 3 kliváže I.	64
Tab. 13 Tabulka zobrazující počet jednotlivých digitalizovaných zrn a jejich procentuální podíl v digitalizované mapě 2 kliváže II.	69
Tab. 14 Tabulka zobrazující EAD měření v μm z hlediska minima, mediánu, maxima a průměrných velikostí jednotlivých minerálních fází v mapě 2 kliváže II.	70
Tab. 15 Mikrosondové analýzy živců kliváže I. vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže.....	96
Tab. 16 Mikrosondové analýzy živců kliváže II. vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže.....	97
Tab. 17 Mikrosondové analýzy s chemickým složením bodových analýz zrn plagioklasu použitých pro vypočtení rovnovážných teplot pro koexistující zrna draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix kliváže I. a kliváže II.	98

Seznam obrázků

Obr. 1 Geodynamický vývoj Českého masivu	18
Obr. 2 Model subdukce moldanubika pod tepelsko-barrandienskou jednotku na severozápadu	19
Obr. 3 Geodynamický vývoj středoevropských variscid	19
Obr. 4 Model variské orogeneze v moldanubické části Českého masivu	20
Obr. 5 Model tektonického vývoje Českého masivu během variské orogeneze	21
Obr. 6 Mapa hlavních výskytů granulitových komplexů uvnitř jednotek s vysokým stupněm metamorfózy v Českém masivu	22
Obr. 7 Mapy se studovaným granulitovým masivem Blanského lesa	25
Obr. 8 Vzorky s dobře vyvinutým plagioklasovým reakčním lemem okolo kyanitu	27
Obr. 9 BSE snímky dokumentující rekrystalizaci velkého pertitického zrna a vznik jemnozrné matrix	28
Obr. 10 BSE snímek křemenných pásů zděděných ze struktury S1	28
Obr. 11 P-T pseudosekce vypočítané pomocí softwaru THERMOCALC pro felzický granulit vzorku H296-S1	29
Obr. 12 BSE snímky pertitických živců	30
Obr. 13 Sedm fází vývoje pertitických mikrostruktur	31
Obr. 14 Mikrofotografie a P-T pseudosekce felzického granulitu	32
Obr. 15 Mapa jednotlivých minerálních fází s ukázkou odlišných typů prvkových snímků použitých pro digitalizaci a dvou odlišných typů výstupních map	33
Obr. 16 Fotografie odebraných vzorků a jejich řezy použité pro zhotovení výbrusů	36
Obr. 17 Kliváž I. v řezu YZ s hrubozrnnými křemennými pásy	37
Obr. 18 Kliváž I. v řezu XZ s křemennými ribony	38
Obr. 19 Kliváž II. v řezu YZ s hrubozrnnými křemennými pásy	40
Obr. 20 BSE snímky ze dvou částí výbrusu kliváže I. se černě vyznačenými obdélníky analyzovaných území a s čísly analýz	42
Obr. 21 Ternární diagramy s vyneseními chemismy živců z bodových a plošných analýz ze dvou částí výbrusu (13_1 a 12) kliváže I.	43

Obr. 22 Chemické složení živců vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže protínající křemenné pásy kliváže I.	44
Obr. 23 BSE snímky kliváže II. se černě vyznačenými obdélníky analyzovaných území a s čísly analýz	47
Obr. 24 Ternární diagram s vyneseními chemismy živců z bodových a plošných analýz z části výbrusu 1a kliváže II.	47
Obr. 25 Chemické složení živců vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže protínající křemenné pásy kliváže II.	48
Obr. 26 Ternární diagramy kliváže I. pro výpočet maximálních teplot	50
Obr. 27 Chemické složení koexistujících kombinací párů draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix ze dvou oblastí v kliváži I.	50
Obr. 28 Chemické složení draselného živce a exoluční lamely porfyroklastu pertitu a pertitu v matrix I. ze dvou oblastí v kliváži I.	51
Obr. 29 Ternární diagramy kliváže II. pro výpočet maximálních teplot	53
Obr. 30 Chemické složení koexistujících kombinací párů draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix z oblasti 1a v kliváži II.	53
Obr. 31 Chemické složení draselného živce a exoluční lamely pertitu v matrix I. z oblasti 1a v kliváži II.	54
Obr. 32 Některé prvkové mapy použité k digitalizaci mapy 1 kliváže I.	56
Obr. 33 Digitalizovaná mikrostruktura mapy 1 kliváže I. s křemennými pásy a dvouživcovou matrix	56
Obr. 34 Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně mapy 1	57
Obr. 35 Boxploty zobrazující distribuci velikostí zrn jednotlivých minerálních fází v μm pomocí EAD u mapy 1 kliváže I.	58
Obr. 36 Přednostní tvarová orientace jednotlivých minerálních fází (Qz v pásku, Qz v matrix, Kfs, Plg a Plg (albitový) lem; SPO zrn) v doméně mapy 1 kliváže I.	59
Obr. 37 Zkoumané hranice zrn jednotlivých minerálních fází domény mapy 1 kliváže I.	60
Obr. 38 Růžicové diagramy zobrazující přednostní tvarovou orientaci jednotlivých hranic zrn v doméně mapy 1 kliváže I.	61

Obr. 39 Graf zobrazující sílu SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) v doméně mapy 1 kliváže I.....	61
Obr. 40 Některé prvkové mapy použité k digitalizaci mapy 3 kliváže I.....	62
Obr. 41 Digitalizovaná mikrostruktura mapy 3 kliváže I. s porfyroklastem pertitu a dvouživcovou matrix	63
Obr. 42 Distribuce křemenných zrn (Qz matrix) v doméně mapy 3	63
Obr. 43 Boxploty zobrazující distribuci velikostí zrn jednotlivých minerálních fází v μm pomocí EAD u mapy 3 kliváže I.	64
Obr. 44 Přednostní tvarová orientace jednotlivých minerálních fází (Qz v matrix, Kfs, Plg a Plg (albitový) lem; SPO zrn) v doméně mapy 3 kliváže I.....	65
Obr. 45 Zkoumané hranice zrn jednotlivých minerálních fází domény mapy 3 kliváže I.	66
Obr. 46 Růžicové diagramy zobrazující přednostní tvarovou orientaci jednotlivých hranic zrn v doméně mapy 3 kliváže I.	67
Obr. 47 Graf zobrazující sílu SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) v doméně mapy 3 kliváže I.....	67
Obr. 48 Některé prvkové mapy použité k digitalizaci mapy 2 kliváže II.	68
Obr. 49 Digitalizovaná mikrostruktura mapy 2 kliváže II. s křemennými pásy a dvouživcovou matrix	69
Obr. 50 Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně mapy 2.....	69
Obr. 51 Boxploty zobrazující distribuci velikostí zrn jednotlivých minerálních fází v μm pomocí EAD u mapy 2 kliváže II.....	70
Obr. 52 Přednostní tvarová orientace jednotlivých minerálních fází (Qz v pásku, Qz v matrix, Kfs, Plg a Plg (albitový) lem; SPO zrn) v doméně mapy 2 kliváže II.	71
Obr. 53 Zkoumané hranice zrn jednotlivých minerálních fází domény mapy 2 kliváže II.....	72
Obr. 54 Růžicové diagramy zobrazující přednostní tvarovou orientaci jednotlivých hranic zrn v doméně mapy 2 kliváže II.	73
Obr. 55 Graf zobrazující sílu SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) v doméně mapy 2 kliváže II.	73

Obr. 56 Inverzní pólové diagramy zkonstruované vůči ose z pro křemen, draselný živec a plagioklas použité pro barvení map krystalografických orientací.....	74
Obr. 57 Data EBSD domény 2_1 kliváže I.	75
Obr. 58 Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 2_1 kliváže I.....	75
Obr. 59 Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 2_1 kliváže I.	76
Obr. 60 Data EBSD domény 3_1 kliváže I.	77
Obr. 61 Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 3_1 kliváže I.....	77
Obr. 62 Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 3_1 kliváže I.	77
Obr. 63 Data EBSD domény 13_1 kliváže I.	78
Obr. 64 Distribuce křemenných zrn (Qz matrix) v doméně 13_1 kliváže I.	78
Obr. 65 Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v matrix, draselného živce, plagioklasu a porfýroklastu pertitu v doméně 13_1 kliváže I.....	79
Obr. 66 Data EBSD domény 1_1 (první část) kliváže II.....	80
Obr. 67 Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 1_1 (první část) kliváže II.	80
Obr. 68 Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 1_1 (první část) kliváže II.	80
Obr. 69 Data EBSD domény 1_1 (druhá část) kliváže II.	81
Obr. 70 Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 1_1 (druhá část) kliváže II.	82

Obr. 71 Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 1_1 (druhá část) kliváže II.....	82
Obr. 72 Data EBSD domény 2 kliváže II.	83
Obr. 73 Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 2 kliváže II.	83
Obr. 74 Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 2 kliváže II.....	84
Obr. 75 Data EBSD domény 6_3 kliváže II.	84
Obr. 76 Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 6_3 kliváže II.	85
Obr. 77 Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 6_3 kliváže II.....	85
Obr. 78 Vzorky OL1_Q (kliváž I.) a H296 (kliváž II.) použité pro zhotovení válečků o průměru 5 mm zalité sádrou pro omezení nerovností jednotlivých ploch.....	86
Obr. 79 Snímky rentgenové tomografie vzorku OL1_Q (kliváž I.).....	87
Obr. 80 Snímky rentgenové tomografie vzorku H296 (kliváž II.).....	87
Obr. 81 Jednotlivá stádia mikrostrukturního vývoje pertitu pro tlaky 18 kbar a 15 kbar	89
Obr. 82 Ukázka předpokládaného rozpadu živců s vypočtenými rovnovážnými teplotami z kliváže I.	91
Obr. 83 Názorná ukázka z kliváže I.	91
Obr. 84 Schematická ukázka vztahu orientace kliváže S2 vůči orientaci SPO hranic zrn původní dvouživcové matrix	94

1 Motivace

Český masiv představuje poměrně dobře zdokumentovaný segment variského orogénu. Navzdory rozdílům mezi jednotlivými koncepčními modely vysvětlujícími variský vývoj Českého masivu se tyto modely obecně shodují v tom, že velké části felzických granulitů v Českém masivu představují ztlustělou orogenní spodní kůru. Studovaná oblast granulitového masivu Blanského lesa reprezentuje jeden z největších odkryvů orogenní spodní kůry v evropských variscidách, a tím umožňuje studium její deformace. Studie se zabývá nejstarší rozpoznanou deformační mikrostrukturou granulitů Blanského lesa s cílem pochopení reologického chování těchto hornin v podmínkách spodní kůry před jejich modifikací během exhumace. Detailní studium mikrostruktur se zaměřuje zejména na vznik destičkových křemenů a rozpad ternárních živců v proto-stádiu vývoje granulitů. Analýza mikrostruktur se zabývá zhodnocením geometrických aspektů těchto křemenných zrn ve vztahu k jejich krystalografické orientaci, možnými příčinami vzniku geometrie těchto křemenných zrn a chováním okolní živcové matrix ve snaze objasnit rozpad peritů.

2 Interpretace granulitů Českého masivu v kontextu variské orogeneze

Významné orogenní události, které proběhly v období od středního devonu do spodního permu, vedly k formování variského orogenního pásma v Evropě. Nejvýchodnější část tohoto orogenního pásma zaujímá Český masiv, který je „mozaikou“ čtyř regionálních litotektonických jednotek, jež se vyznačují odlišným stářím, složením a tektonometamorfním vývojem (Matte, 1991; Matte, 2001).

Tyto jednotky jsou definovány jako tepelsko-barrandienská oblast, sasko-durynská oblast – saxothuringikum, moravskoslezská oblast – moravosilezikum a moldanubická oblast – moldanubikum. Jednotky se výrazně odlišují ve svém paleozoickém vývoji během variské orogeneze, ale také mají celou řadu společných znaků, a to hlavně v neoproterozoickém vývoji (Condie, 1989). To však neplatí pro moldanubickou oblast, která je o poznání komplikovanější. Moldanubická oblast má odlišnou litologii, jiný metamorfni vývoj a odchylná jsou i její tektonická omezení (Condie, 1989; Babuška a Plomerová, 2001).

Předmětem zájmu této studie jsou granulity nacházející se v moldanubiku jižních Čech. Studovaná oblast granulitového masivu reprezentuje jeden z největších odkryvů spodní kůry, která tvořila orogenní kořen a byla exhumována během variské orogeneze. Avšak existuje více

interpretací o tom, čeho je vlastně tento deformační záznam spodnokorových vysokotlakých hornin výsledkem.

2.1 Přehled modelů variského vývoje Českého masivu

Jednou z nejsložitějších otázek ohledně variského geologického vývoje Českého masivu je tektonický vývoj kontaktu saxothuringické, moldanubické a tepelsko-barrandienské jednotky během svrchního devonu až svrchního karbonu.

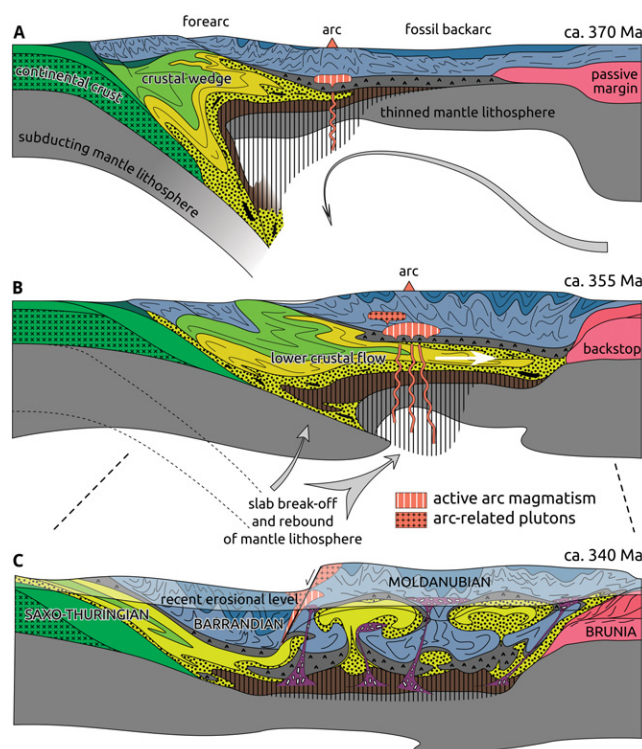
V současné době existuje na toto téma několik hypotéz a modelů. Jednotlivé hypotézy vysvětlují geologický vývoj odlišným způsobem, a proto se vede ohledně této problematiky mnoho vědeckých diskuzí.

Klíčová otázka pro interpretaci tektonického vývoje je lokalizace subdukčních zón a polarita variské subdukce a s tím spjatá pozice magmatismu. Existují dva hlavní názorové proudy: (1) modely uvažující subdukci saxothuringika k jihovýchodu pod tepelsko-barrandienskou jednotku podél tepelské sutury a (2) naopak modely předpokládající subdukci moldanubické jednotky pod tepelsko-barrandienskou jednotku směrem k severozápadu.

Schulmann et al. (2009, 2014) rozlišují několik fází vývoje, kdy se (1) začátkem devonu začala podsouvat jednotka saxothuringika pod jednotku tepelsko-barrandienskou (Obr. 1a). (2) Následná relaminace kontinentální kůry subdukující desky později vyvolala spodnokorový tok na rozhraní kůry a pláště (Schulmann et al., 2014; Obr. 1b). (3) Pozdější diapirismus a vrásnění relaminované felzické kůry transformované v granulit vedl k exhumaci jednotlivých granulitových těles (Obr. 1c). (4) V poslední fázi docházelo ve východní části moldanubika k nasouvání příkrovů na jednotku brunovistulika ~341–339 Ma (např. Štípská a Schulmann, 1995).

Janoušek a Holub (2007) navrhuje souhlasný vývoj a poukazují na geochemickou příbuznost felzických granulitů Blanského lesa s početnými variskými granitoidy v saxothuringiku.

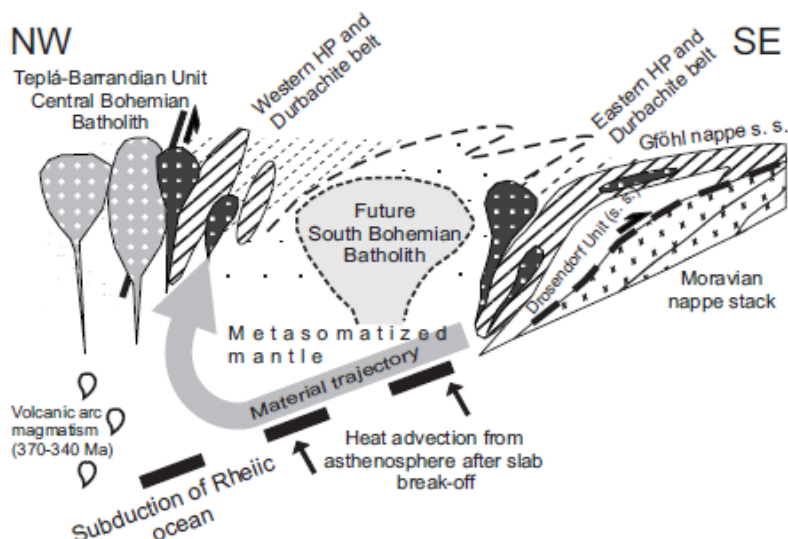
Tato interpretace polarity subdukce je rovněž uvedena v práci Konopáská a Schulmanna (2005) a podobný názor byl publikován Žákem et al. (2005, 2009).



Obr. 1. Geodynamický vývoj Českého masivu. (a) Subdukce a relaminace felzické kontinentální kůry saxothuringické jednotky. (b) Redistribuce relaminované kůry na bázi nadložní desky. Bílá šipka zobrazuje směr toku relaminované felzické kůry. (c) Exhumace granulitů vertikálními kanály (Schulmann et al., 2014).

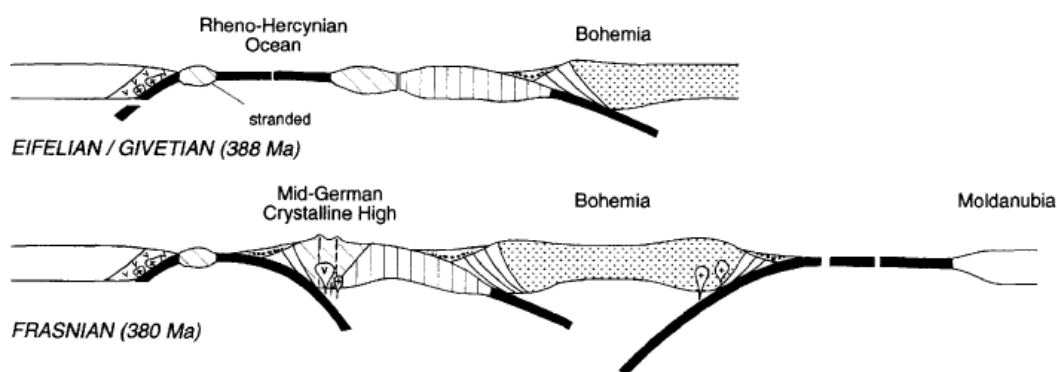
Ve shodě s výše uvedenými modely práce Dörra a Zulaufa (2010), která je založena na základě studií radiometrického datování, poklesových střižných zón a mikrostrukturních analýz, uvažuje, že moldanubikum a tepelsko-barrandienská jednotka představují jeden krustální blok a že v tomto bloku v současném erozním řezu vedle sebe vystupují horniny svrchní kůry (tepelsko-barrandienská jednotka) a spodní až střední kůry (moldanubikum).

Opačný názor ohledně polarity variské subdukce zastávají např. Finger et al. (2007), kteří interpretují model pravděpodobné subdukce části Rheického oceánu k západu až severozápadu. Finger et al. (2007) označují jihovýchodní sektor Českého masivu (tzn. západní část současné moldanubické jednotky na hranici s tepelsko-barrandienskou jednotkou) jako akreční klín, pod který byly zataženy horniny gföhlské jednotky a Moravika. Nárůst teploty a izostatických sil souvisejících s odlomením subdukované desky následně vedl k exhumaci hornin gföhlské jednotky (Obr. 2).



Obr. 2. Model subdukce moldanubika pod tepelsko-barrandienskou jednotku na severozápadu (Finger et al., 2007).

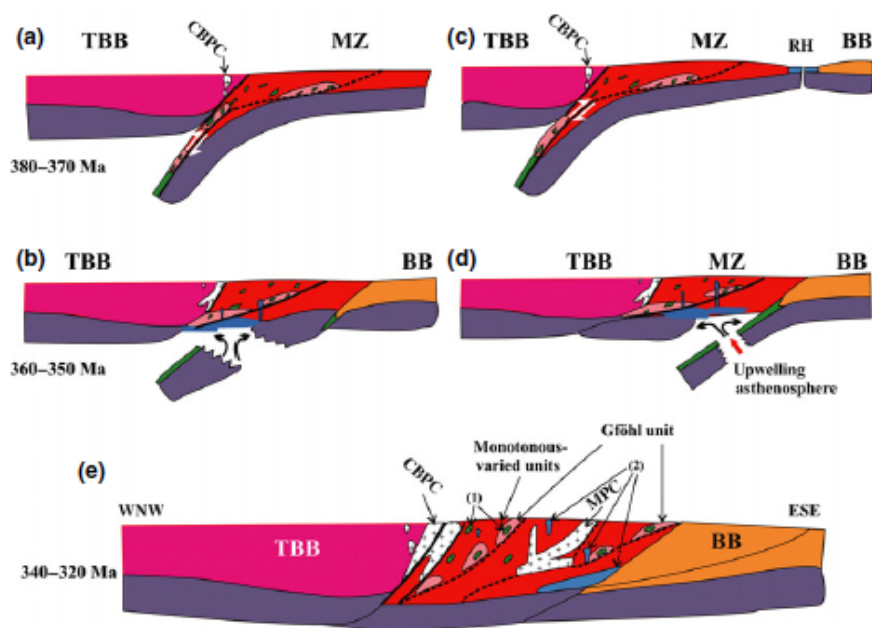
Podobný názor na polaritu variské subdukce vyslovil i Franke (2000), který navrhuje subdukcí moldanubika pod tepelsko-barrandienskou jednotku směrem k severozápadu v oblasti tzv. gřohlské sutury a zároveň subdukcí ze severozápadu pod tepelsko-barrandienskou jednotku. Následně byla jihozápadní a západní část tepelsko-barrandienské jednotky intrudována granitoidy ve dvou věkových fázích (~340 Ma a ~325–305 Ma) a na obou okrajích dochází k vmístění vysokoteplotních granulitů a eklogitů (Obr. 3). Starší skupina je reprezentována středočeským plutonickým komplexem, jenž Franke (2000) interpretuje také jako magmatický oblouk.



Obr. 3. Geodynamický vývoj středoevropských variscid (upraveno podle Frankeho, 2000).

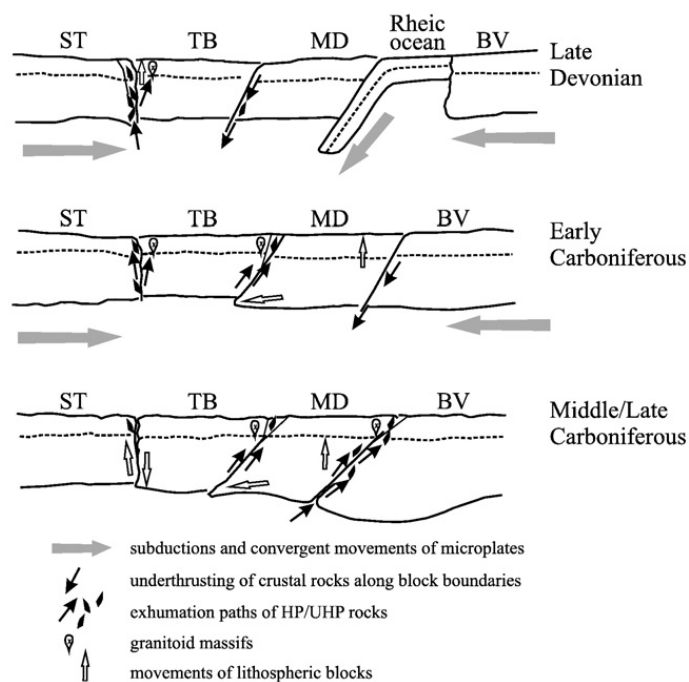
Faryad et al. (2015) interpretují model, ve kterém dochází k subdukcí moldanubické desky pod desku tepelsko-barrandienskou směrem k severozápadu. Autoři předpokládají odtržení subdukované desky v hloubce (~360–350 Ma), což vytvořilo prostor pro výstup

astenosféry pod akrečním komplexem a způsobilo prudký nárůst teploty (Obr. 4a, b). Alternativní model, kde je výstup astenosféry také způsoben odtržením desky, souvisí se subdukcí rhenohercynského oceánu (Obr. 4c, d). Následný vznik a exhumace HP a UHP hornin je v obou případech interpretován podél kontaktu subdukce moldanubické desky pod desku tepelsko-barrandienskou. Poslední fází tohoto procesu je magmatismus moldanubického a středočeského plutonického komplexu (Obr. 4e).



Obr. 4. Model variské orogeneze v moldanubické části Českého masivu (podle Faryada et al., 2015). Zkratky: moldanubický plutonický komplex (MPC), středočeský plutonický komplex (CBPC); tepelsko-barrandienský blok (TBB), Brunovistulikum (BB), moldanubická zóna (MZ), rhenohercynský oceán (RH).

Babuška et al. (2010) a Babuška a Plomerová (2013) interpretují model, který předpokládá možný tektonický vývoj Českého masivu tak, že došlo ke třem subdukcím, a to subdukcím Saxothuringické, Gföhlské a Rheické oceánské litosférické desky. Tyto subdukce pravděpodobně pomohly následnému vytvoření exhumačních kanálů. Každá oceánská subdukce byla následována kolizí kontinent-kontinent, kdy došlo k pohybu moldanubické desky směrem pod tepelsko-barrandienskou jednotku, pohybu brunovistulické desky pod desku moldanubickou a k vmístění granitoidů (Obr. 5).



Obr. 5. Model tektonického vývoje Českého masivu během variské orogeneze, bez měřítka (Babuška a Plomerová, 2013).

3 Felzické granulity

Navzdory kontroverznímu pojetí tektonického vývoje Českého masivu se výše citovaní autoři shodují na tom, že granulity Českého masivu reprezentují exhumovaný orogenní kořen a že tedy tyto horniny mohou reflektovat hluboké orogenní procesy.

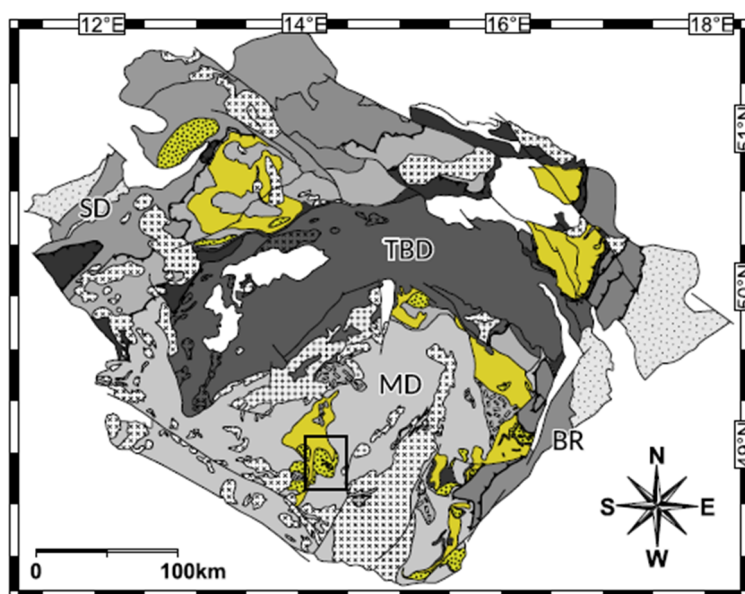
Pojmem granulit je označována silně metamorfovaná hornina, jejíž vznik můžeme zařadit do podmínek granulitové facie, některé typy i do facie eklogitové nebo amfibolitové. Granulity často přecházejí stavbou a složením do tzv. granulitových rul (Kotková, 2005). Z petrologického hlediska se hornina dále dělí na mafické a felzické granulity, kdy protolitem felzických granulitů mohou být felzické magmatity nebo sedimenty arkózového charakteru. Felzické granulity v Českém masivu vznikají za teplot od 700 °C až po více než 1000 °C a dosahují tlaků i více než 2 GPa.

Český masiv je významnou typovou lokalitou těchto hornin, kde se nachází tělesa o velikosti až 20 × 15 km (Kotková, 2005). Typickou minerální asociací felzického granulitu je křemen (často typicky zploštělý ve směru foliace), živec (výrazně pertitický draselný živec a plagioklas), granát, kyanit nebo sillimanit a biotit. Akcesorickými minerály bývají zirkon, rutil a spinel. Granulity v Českém masivu jsou často doprovázeny výskytem hornin plášťového

původu, např. granátickými peridotity, eklogity, horninami obsahujícími UHP minerální fáze jako jsou mikrodiamanty nebo coesit (Wilner et al., 1997; Massonne, 2003).

3.1 Výskyt granulitů v Českém masivu

Granulitové masivy Českého masivu se vyskytují v oblasti moldanubika jižních Čech, jihozápadní Moravy a Waldviertelu v Dolním Rakousku, a klasické saské granulity v oblasti saxothuringika (Obr. 6; Kotková, 2005). Charakteristické jsou svými rozdílnými P-T podmínkami (Tab. 1).



Obr. 6. Mapa hlavních výskytů granulitových komplexů (tečkovaně) uvnitř jednotek s vysokým stupněm metamorfózy (žlutě) v Českém masivu, podle Maierové et al. (2017). SD – Saxothuringikum, TBD – Tepelsko-barrandienská jednotka, MD – Moldanubická jednotka, BR – Brunie. Poloha granulitového komplexu Blanského lesa je vyznačena obdélníkem.

3.2 Moldanubické granulity

Granulity vytváří velká tělesa v moldanubických rulách. Významná jsou tělesa až 20 km dlouhých granulitů, která tvoří křišťanovský, prachatický a lišovský masiv. Pro křišťanovský masiv jsou charakteristické především felzické granulity, tmavé pyroxenické a granátické granulity tvoří pouze čočky nebo polohy v těchto felzických granulitech. Pravidelně jsou doprovázeny granátickými peridotity (Vrána, 1997). Dominantní horninový typ prachatického masivu je křemen + K-živec felzický granulit, který obsahuje drobné granáty, kyanit a rutil. Granulity prachatického masivu jsou hojně doprovázeny tělesy amfibolitů, mramorů a serpentinitů (Kröner et al., 2000). Lišovský masiv je charakteristický výskytem mafických a intermediárních granulitů (Suk, 1981).

Tab. 1. Shrnutí odhadů P-T pro HP granulity ČM.

Lokalita	HP fáze P (kbar)	T (°C)	G typ	Reference
<i>Moravské moldanubikum</i>				
Strážecké moldanubikum	18	850	F	Tajčmanová et al. (2006)
<i>Moldanubikum jižních Čech</i>				
Blanský les masiv	11,5–12,5	900–950	F	Vrána (1989)
	11–13	850–950	hyperdraselné	Vrána (1989)
	14	900	M	Owen a Dostál (1996)
	14	940	F	Kotková a Harley (1999)
	18	1000	F	O'Brien (1999)
	16–17	970–1000	M	Kröner et al. (2000)
	16–18	850–880	F	Franěk et al. (2011b)
	18	850–950	M–I	Štípská et al. (2016)
Prachatický masiv	18	nad 1000	F	Kröner et al. (2000)
Lišovský masiv	13–14	920	M	Kotková (1998a, b)
Křišťanovský masiv	10–15	780–850	F	Nahodilová et al. (2011)
Náměšťský masiv	11–16	750	F	Urban (1992)
<i>Moldanubikum Dol. Rakouska</i>				
St. Leonhard masiv	14	920	F	Carswell a O'Brien (1993)
	16	970	M	Carswell a O'Brien (1993)
	15–19	950–1050	M	Cooke (2000)
	15,6	1090	M	Cooke et al. (2000)
	14	nad 950	I	Racek et al. (2008)
Dunkelsteiner Wald	16	1050	I	Carswell a O'Brien (1993)
Drosendorf Window	15	800	F	Racek et al. (2006)
Kutnohorský krystalinický komplex	18–22	800–920	F	Vrána et al. (2005)
	14	670	F	Vrána et al. (2005)
	22	900	F	Nahodilová et al. (2008)
	23	850–900	F	Nahodilová et al. (2014)
	16	820	F	Faryad et al. (2010)
	17,6	850	F	Jedlička et al. (2015)
<i>Saxothuringikum</i>				
Saský granulitový masiv	22	1010–1060	M	Romer a Rötzler (2001)
	22,3	967	F	Romer a Rötzler (2001)
		1080–1090	F	Zack et al. (2004)
Ohárecké krystalinikum	15–17	750–800	F	Kotková (1993)
	15–17	nad 830	F	Kotková et al. (1996)
	16	850	F	Konopásek et al. (2014)
Münchbergský masiv	18	1100	F–I	Gayk et al. (1995)
	25	nad 1200	F–I	Gayk et al. (1995)
<i>Sudety</i>				
Rychlebské hory	až do 18	900	M	Štípská et al. (2004)

Legenda: F – felzický, I – intermediární, M – mafický, G – granulit

Významný je také náměšťský granulitový masiv pestré skupiny moldanubika, který je na západu a jihu lemován téměř kontinuálním pásem amfibolitů. Náměšťské felzické granulity mají minerální složení křemen, K-živec, granát, kyanit, rutil a biotit (Suess, 1912; Urban, 1992).

Kutnohorský komplex tvoří korové a plášťové horniny metamorfované v podmínkách amfibolitové a granulitové facie (Faryad et al., 2010). Jeho felzické granulity obsahují čočky a budiny granátického peridotitu, granátického pyroxenitu a eklogitu (Faryad, 2009).

Pod moldanubické granulity také spadá masiv Dunkelstein Wald a St. Leonhard na území Dolního Rakouska. Felzické granulity z masivu Dunkelstein Wald obsahují almandin + kyanit + mesopertit + křemen. Naopak mafické peraluminní granulity jsou doprovázeny plášťovými peridotity a obsahují primární minerální asociaci granát + Al-bohatý klinopyroxen + kyanit (Carswell a O'Brien, 1993). St. Leonhard granulitový masiv se skládá z anatektických pararul, amfibolitů, mramoru, méně hojných křemenců a metamorfovaných kyselých vulkanických hornin. V masivu dominují kyanit–K-živcové granulity, které obsahují vzácné granát–klinopyroxen–antipertitické granulity jako centimetrové vrstvy a budiny uvnitř felzického granulitu (Cooke et al., 2000). V severní části masivu se nachází pás granátických peridotů (Becker, 1997).

K dalším granulitovým tělesům v moldanubiku, jež jsou součástí gföhlské jednotky, patří dvě drobnější granulitová tělesa u Novosedel nad Nežárkou a těleso Krásnejovka (Cháb et al., 2008), které bylo původně popsáno jako ortorula (Kodým, 1966). Později byla tato hornina klasifikována jako granulit (Vrána, 1992).

Moldanubický granulit Blanského lesa je detailně popsán v následující kapitole.

3.3 Granulity Blanského lesa

3.3.1 Pozice v moldanubiku, stáří a asociované horniny

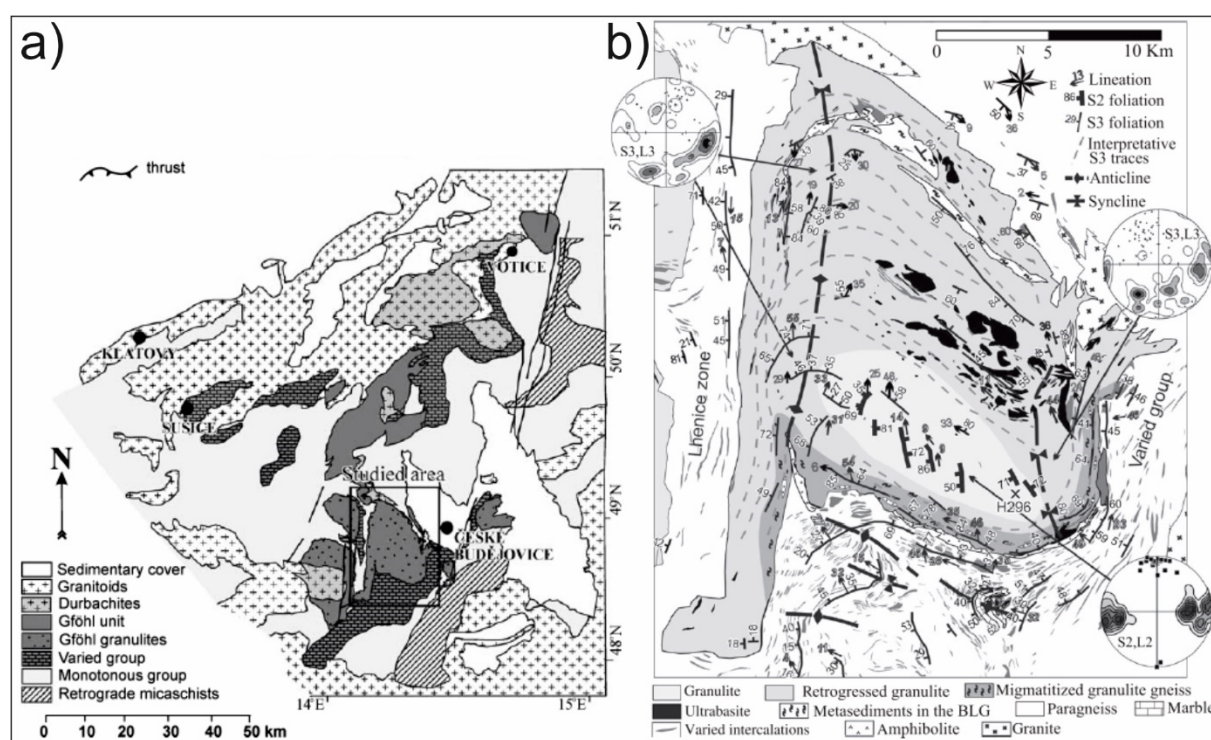
Studovaná oblast se nachází v moldanubiku jižních Čech v Jihočeském kraji blízko Českých Budějovic a Českého Krumlova. Na západu se vyskytuje lhenický prolom, který odděluje Blanský masiv od sousedních granulitových masivů, a to masivů prachatického a křišťanovského. Na jihu a východu sousedí granulity Blanského lesa s pestrá skupinou českokrumlovskou, na severu navazují na granitoidy typu Čertovo břemeno a pararuly monotónní skupiny a na severovýchodu pak vede hranice na styku granulitů a budějovické pánve (Kodým, 1981; Obr. 7a).

Granulitový masiv Blanského lesa je těleso oválného tvaru o velikosti 22×14 km s odhadovanou mocností 1,5 km a je tvořen felzickými granulity s uzavřenými několik kilometrů dlouhými čočkami ultrabazických hornin, četnými budinami mafických granulitů

a vápenato-silikátových hornin. Podél severního okraje se objevují četné vložky amfibolitu, mramoru, erlánů, kvarcitů a grafitických pararul (Obr. 7b; Kodym, 1985).

Wendt et al. (1994) označili variské stáří 370 Ma a toto stáří bylo interpretováno jako stáří krystalizace protolitu felzických granulitů. Kromě toho U–Pb datování na zirkonech provedené Krönerem et al. (2000) dává stáří granulitu Blanského lesa $339,8 \pm 2,6$ Ma. Další U–Pb datování na zirkonech provedené Štípskou et al. (2016) navrhuje stáří $338 \pm 3,4$ Ma.

Protolit těchto vysokotlakých hornin, jejich pozice a exhumační mechanismus je předmětem stálé diskuze. Schulmann et al. (2005) navrhuji několikafázový model rychlé exhumace orogenní spodní kůry asociované s vývojem subvertikálního výstupového kanálu. Tento proces je umožněn nízkou viskozitou spodní kůry na spodu orogenního kořene a jejím felzickým složením. Franěk et al. (2011a) navrhuji model diapirické exhumace.



Obr. 7. Mapy se studovaným granulitovým masivem Blanského lesa. (a) Pozice granulitového masivu Blanského lesa v moldanubiku (Franěk et al., 2006). (b) Strukturní mapa granulitového masivu Blanského lesa v moldanubiku (Franěk et al., 2011b).

3.3.2 Strukturní vývoj a minerální asociace

Podle Fraňka et al. (2011a, b) rozsáhlé granulitové těleso Blanského lesa zachovává čtyři hlavní planární stavby dokumentující strukturní vývoj. Na základě strukturní a mikrostrukturní analýzy studované oblasti odlišují autoři dvě deformační stavby granulitové facie. Nejstarší stavba S1 je definovaná střídáním křemenných pásek s pásky jemnozrnné směsi

bohaté plagioklasem, granátem, drobnými zrny křemene a velkými porfyroklasty alkalických živců. Mikroskopické studie odhalují transpozici do kliváže S2 a přepracování S1 struktur do jemnozrné živcem dominující matrix obsahující alkalický živec, plagioklas, křemen a granát (Franěk et al., 2006; 2011a, b).

S1 a S2 foliace obsahuje minerální asociaci vysokotlaké granulitové facie skládající se z $Qz + Kfs + Pl + Grt + Ky + Bt$. Mikroskopické studie ukazují, že při tomto intenzivním přepracování S1 a penetrativním vývoji nové planární struktury S2 dochází k rozpadání křemenných pásů a vzniku tzv. ribonů (žeber). Ribony jsou protáhlá křemenná zrna s vysokým osním poměrem, která jsou s rostoucí intenzitou deformace desintegrována v jednotlivé objekty obklopené jemnozrnou živcovou matrix. Kliváž S2 je makroskopicky charakterizovaná silnou přednostní orientací těchto křemenných ribonů a její vznik byl interpretován v souvislosti s exhumací granulitu (Franěk et al., 2006; 2011a, b).

Třetí deformační stavba S3 studovaných granulitů se vyvinula během exhumace při retrogresi v amfibolitové facii. Retrográdní granulity v masivu převládají (Franěk et al., 2006; Obr. 7b).

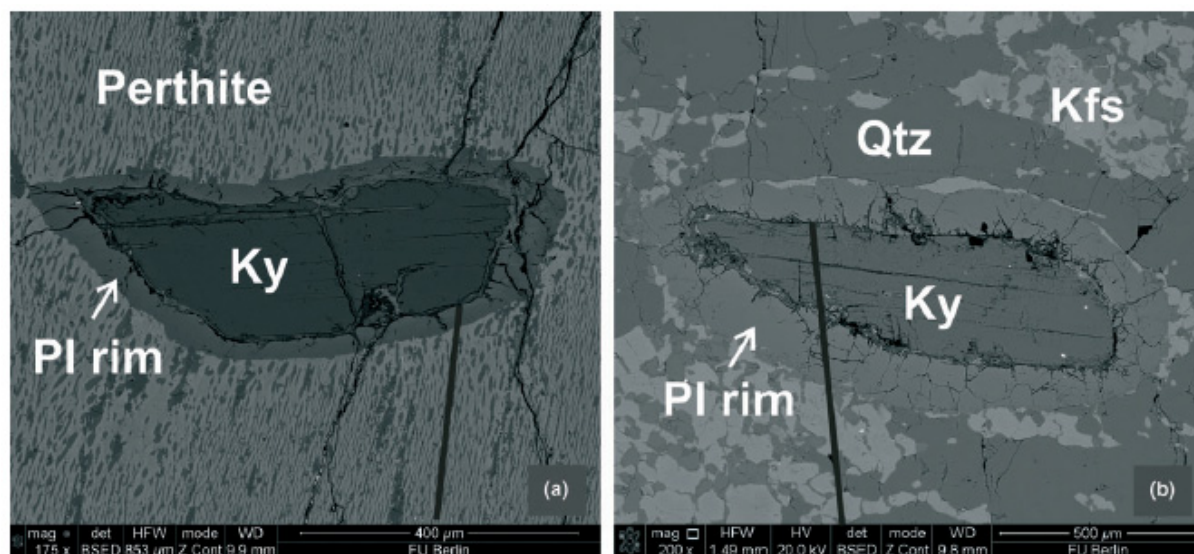
Čtvrtá deformační stavba S4 také vyvinutá v amfibolitové facii se vyznačuje přepracováním stavby S3, což pokračuje vývojem mělce ukloněných střížných zón často doprovázených vrásněním stavby S3 v různých měřítkách. Intenzita deformační stavby S4 systematicky klesá od jihovýchodu k severozápadu a granulitový masiv Blanského lesa je touto deformací téměř nedotčen (Franěk et al., 2006). Stavbami S3 a S4 se však předkládaná práce nezabývá.

Vzorky felzických granulitů Blanského lesa jsou dále charakteristické výskytem kyanitu, který je považován za relikv vysokotlaké metamorfní asociace, jenž se stal metastabilní během dekomprese. Okolo zrn kyanitu lze pozorovat dobře vyvinuté plagioklasové lemy a symplektitové struktury (Obr. 8a, b; Tajčmanová et al., 2011). Plagioklasové lemy a korony se vyskytují i okolo granátů a jsou interpretovány jako produkt reakcí během dekomprese (Tajčmanová et al., 2007).

U vzorků granulitů granulitové facie je nejstarší mikrostruktura reprezentována výskytem velkých pertitických zrn živce s inkluzemi křemene, granátu a kyanitu, zřídka také retrográdního biotitu a akcesorických minerálů. Inkluze granátu a kyanitu dokumentují, že tyto pertitické živce jsou relikty vysokotlaké metamorfní události (Franěk et al., 2011b).

Tyto velké pertitické živce jsou typické mikrostruktury vzniklé rozpadem původně ternárních živců. Práce Franěka et al. (2011b) a Tajčmanové et al. (2011) dále

dokumentují koexistenci dvou živců vzniklých rozpadem ternárního živce ve vrcholných podmínkách metamorfózy.



Obr. 8. Vzorky s dobře vyvinutým plagioklasovým reakčním lemem okolo kyanitu. (a) BSE snímek s mikrostrukturními vztahy okolo inkluzí kyanitu uvnitř pertitu. (b) BSE snímek s mikrostrukturními vztahy okolo kyanitu v polykrystalinní matrix (Tajčmanová et al., 2011).

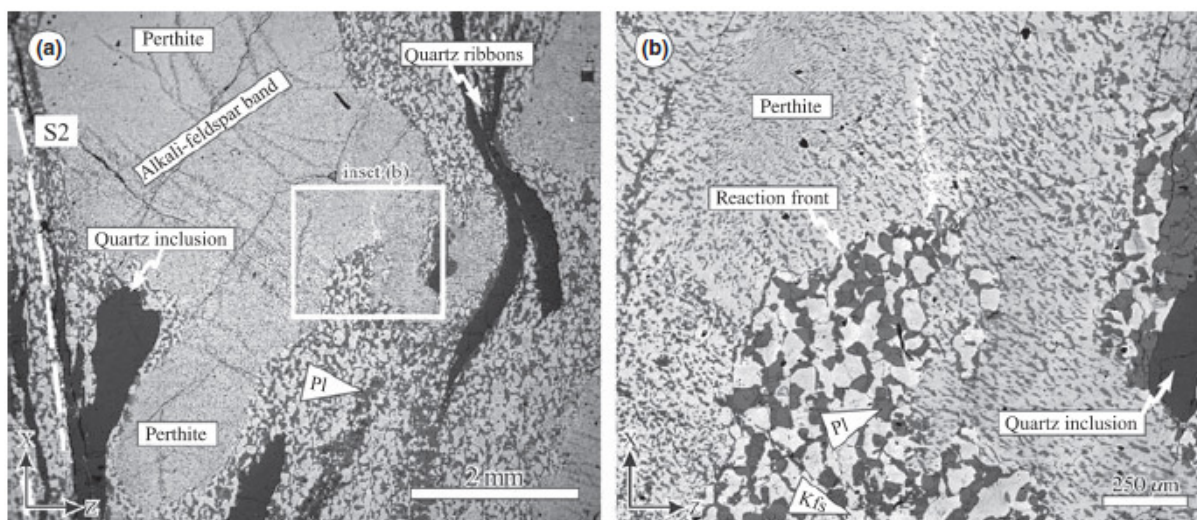
3.3.3 Mikrostrukturní vývoj granulitů

Dle Fraňka et al. (2011b) pertitické alkalické živce prodělaly během exhumace neobvyklý proces heterogenního rozpadu vedoucího ke vzniku jemnozrnné matrix složené z plagioklasu a K-živce.

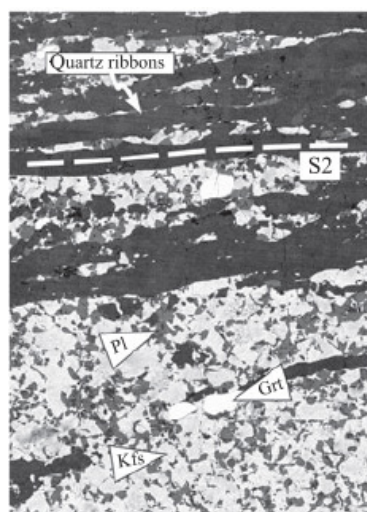
Progresivní rekrystalizace původní hrubozrnné mikrostruktury ternárních živců do jemnozrnné dvouživcové matrix je v práci Fraňka et al. (2011b) popisována jako vznik granulárních domén uvnitř a na okrajích velkých pertitických živců (Obr. 9a, b).

Dále se Franěk et al. (2011b) zabývají mikrostrukturami deformační stavby S2. Tento typ mikrostruktury je definován živcem dominující matrix uzavírající velké křemenné ribony. Křemenné pásy zděděné ze stavby S1 se rozpadly do formy ribonů paralelní s S2 a byly dále dynamicky rekrystalizovány (Obr. 10).

Mikrostruktura spjatá se stavbou S3 je podle Maierové et al. (2017) charakterizována rostoucím množstvím biotitu a sillimanitu související s retrogresí amfibolitové facie. Mikrostruktura S3 vyvinutá z S2 se podle autorů vyznačuje agregací obou živců a jejich většími velikostmi zrn (~180 µm pro K-živce a ~140 µm pro plagioklas).



Obr. 9. BSE snímky dokumentující rekrystalizaci velkého pertitického zrna a vznik jemnozrné matrix. (a, b) Rekrystalizace původního pertitu, ostrá reakční fronta, elongace křemenných inkluzí (Franěk et al., 2011b).

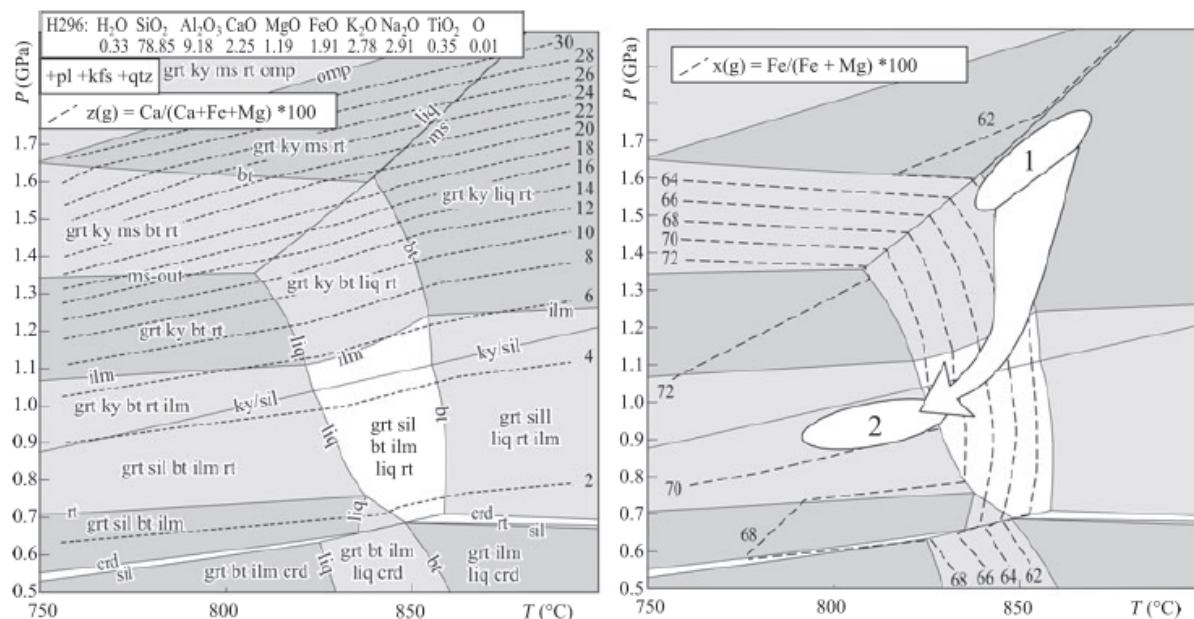


Obr 10. BSE snímek křemenných pásů zděděných ze struktury S1 rozpadlých do formy ribonů, jež jsou paralelní se strukturou S2 (Franěk et al., 2011b).

3.3.4 Teplotně-tlakové odhady podmínek vzniku a vývoje granulitů

Na základě minerální asociace, porfyroklastů alkalického živce s inkluzemi křemene, granátu, kyanitu, biotitu a rutilu byly za pomoci termodynamického modelování určeny vrcholné podmínky metamorfózy granulitů na ~16–18 kbar a 850–880 °C (Franěk et al., 2011b), což autoři asociují se vznikem reliktní stavby S1. Tento vrchol P-T podmínek je odvozen od stavu, kdy porfyroklasty alkalického živce byly v rovnováze s granátem, kyanitem, plagioklasem, křemenem, biotitem a rutile. Stavbu S2 (kliváž) pak tito autoři asociují

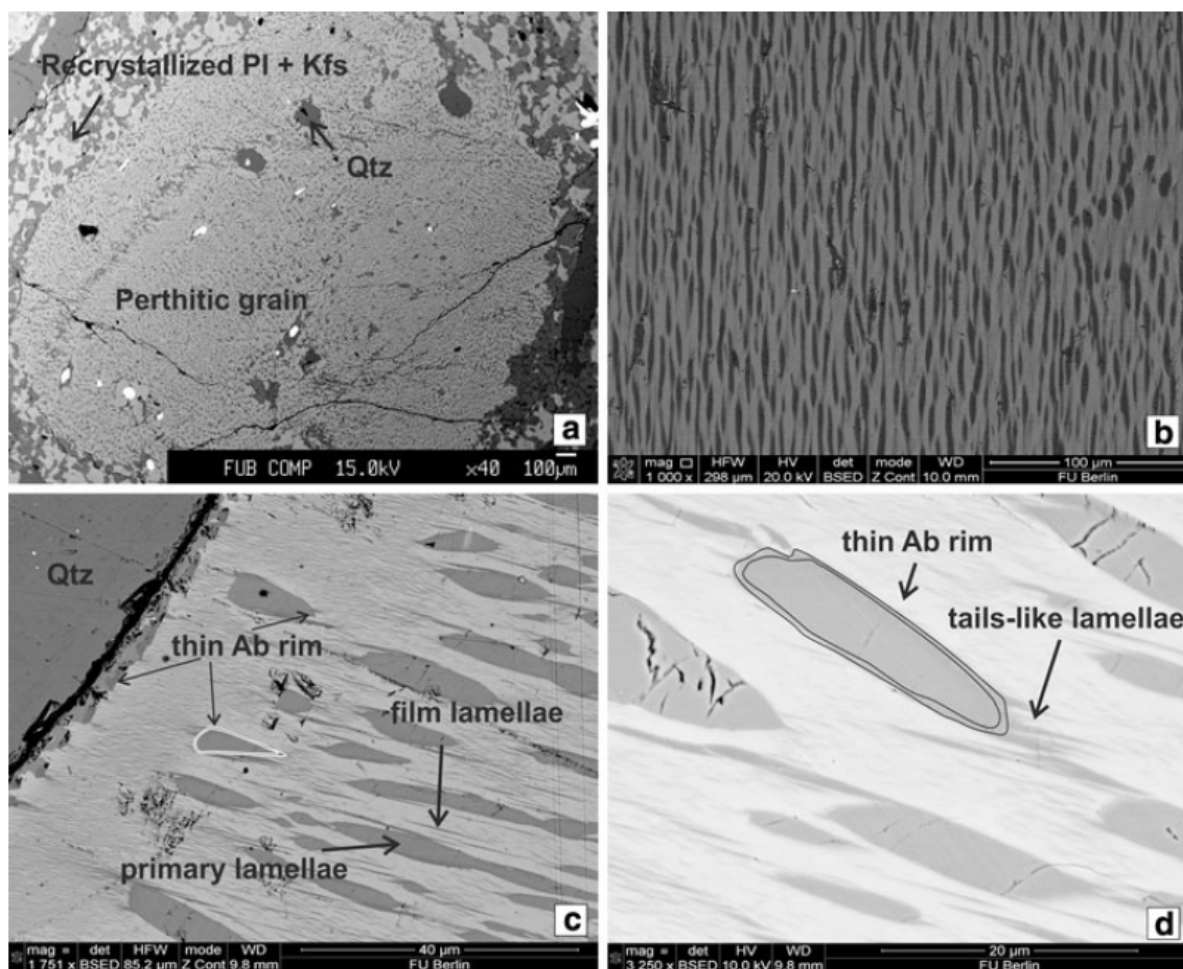
s exhumací a přechodem od vrcholných metamorfních podmínek až do tlaků ~9–10 kbar a teplot 825 °C (Obr. 11).



Obr. 11. P-T pseudosekce vypočítané pomocí softwaru THERMOCALC pro felzický granulit vzorku H296-S1. Zobrazená P-T dráha odráží růst hrubozrnných alkalických živců ve vrcholných podmínkách následovaný dekompresí a vývojem struktury S2 (Franěk et al., 2011b).

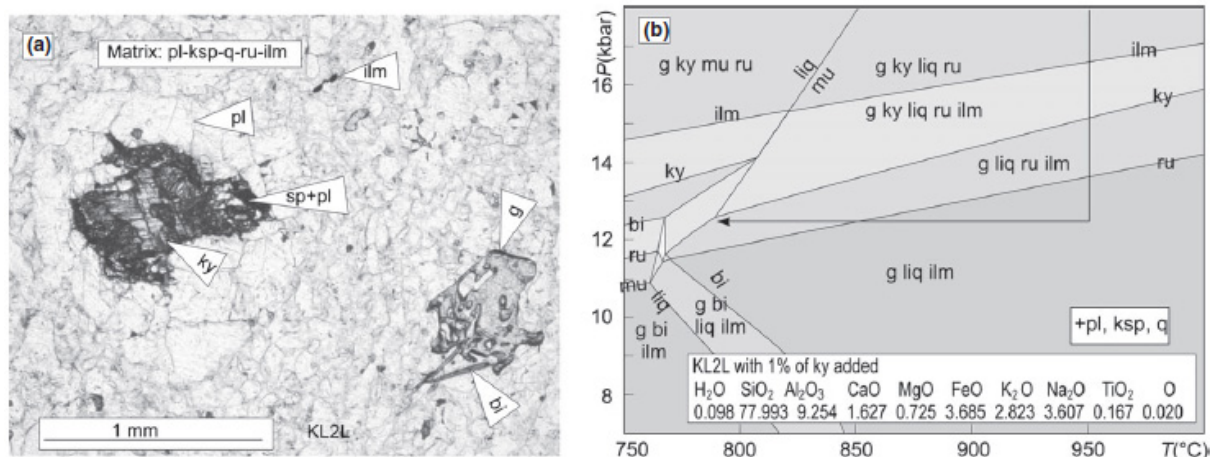
Velké pertitické živce jsou obklopeny rekrystalizovanými živci a křemenem a obsahují několik generací plagioklasových odměšenin (Obr. 12a).

Na základě těchto odměšenin Tajčmanová et al. (2012) interpretují teplotní vývoj studovaných hornin. Tito autoři odhadují maximální teploty z integrovaného složení pertitického zrna, a to na 900–950 °C (fáze I.; Obr. 13) pro 18 kbar. Primární odměšení nastalo při teplotách okolo 850 °C během vysokotlaké fáze metamorfózy (16–18 kbar; fáze II.; Obr. 13). Tato převládající nejstarší první generace odměšení tvoří čočky se silnou tvarovou přednostní orientací (Obr. 12b). Následně došlo k hrubnutí primárních exolučních lamel, které se odehrálo mezi 850–700 °C (fáze III.; Obr. 13). Výrazné hrubnutí primárních lamel se odehrálo okolo velkých inkluzí křemene, kyanitu a granátu a v okrajích pertitických zrn (fáze IV.; Obr. 13). Druhá generace exolučních lamel připomínající vlákna („vlásky“) vznikla okolo 570 °C (fáze V.; Obr. 12c, d). Jako poslední vznikly podle autorů lamely tvořící tzv. „ocásky“ u starších exolučních lamel (fáze VI.; Obr. 12d, 13). Poslední fází je tvarově nepravidelné odměšení čistého albitu, které vzniklo v pozdní fázi petrogenetické historie a pravděpodobně souvisí s fluidní infiltrací a asociovanou albitizací při teplotách okolo 400 °C (fáze VII.; Obr. 13).



Obr. 12. BSE snímky perthitických živečů. (a) Velké perthitické zrna. (b) Hrubé primární exoluční lamely. (c) Hrubé primární lamely a vláskovité lamely. (d) Lamely tvořící tzv. „ocásky“ přiléhající k hrubé primární lamele (Tajčmanová et al., 2012).

Štípská et al. (2014) uvažují pro felzické granulity P-T dráhu s dřívější izotermální dekompresí od 20 do 12,5 kbar za teplot 950 °C následovanou izobarickým chlazením od 950 °C a tlaků 12,5 kbar (Obr. 14b). Tato P-T dráha je v souladu se stabilitou ky-grt-ru-plg-kfs-qz ve felzickém granulitu při vysokotlakých podmínkách, se separací kyanitu od matrix plagioklasovou korunou během dekomprese a výskytem ilmenitu v matrix (Obr. 14a). Nepatrný biotit vyvinutý hlavně u granátu (Obr. 14a) je v souladu s tím, že biotit se stává stabilní během chlazení. Kyanit je na okrajích nahrazen sp-plg symplektitovou strukturou a je obklopen plagioklasovou korunou, což (jak již bylo řečeno) separuje kyanit od matrix během dekomprese (Obr. 14a).



Obr. 14. (a) Mikrofotografie a (b) P-T pseudosekce felzického granulitu (pl – plagioklas, ksp – draselný živec, q – křemen, ru – rutil, ilm – ilmenit, ky – kyanit, mu – muskovit, bi – biotit, sp – spinel, g – granát; Štípská et al., 2014).

4 Metody studia a analytické podmínky studovaných vzorků

4.1 Elektronový skenovací mikroskop a elektronová mikrosonda

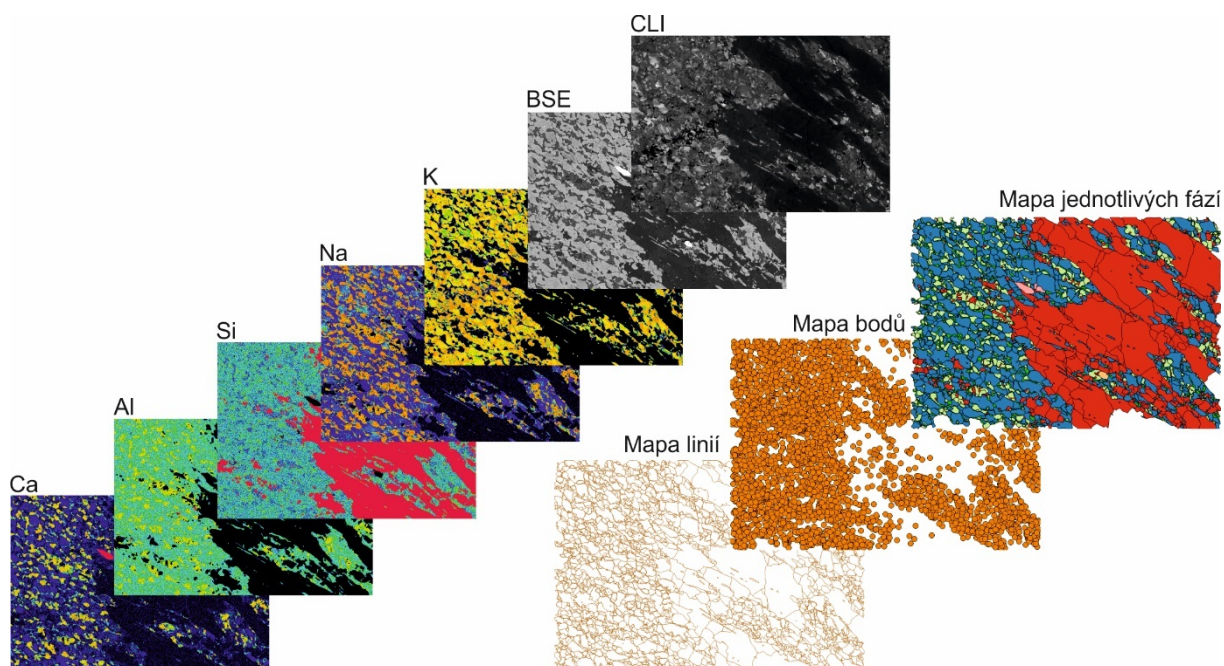
Chemické analýzy minerálů byly získány v laboratořích mikroanalýzy na Ústavu petrologie a strukturní geologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy na 1) rastrovacím elektronovém mikroskopu Tescan Vega za podmínek urychlovacího napětí 15 kV, proudu svazku do 30 nA a na 2) elektronovém mikroanalyzátoru JXA-8530F HyperProbe (JEOL) za podmínek urychlovacího napětí 15 kV.

Přístroje byly použity k měření plošných i bodových analýz. Měřené pertitické živce byly z části měřeny jako bodové a z části jako plošné analýzy. Plošný skenovací mód byl použit v případě získání integrovaného složení pertitů. Dále byly přístroje použity k vyhotovení BSE snímků (zpětně odražené elektrony), CL (katodoluminiscenční snímky) a snímků s distribucí jednotlivých prvků (Ca, Al, Si, Na a K).

4.2 Digitalizace horninových mikrostruktur pomocí programu QGIS

Pro kvantitativní analýzu horninových mikrostruktur granulitu Blanského lesa bylo vybráno několik zájmových území. K digitalizaci byly použity snímky BSE (zpětně odražené elektrony), CL (katodoluminiscenční snímky) a snímky s distribucí jednotlivých prvků (Ca, Al, Si, Na a K) těchto zájmových území. Digitalizace byla provedena pomocí geografického informačního systému v programu Quantum GIS tak, že snímky byly uspořádány ve vrstvách a každá hranice jednotlivé minerální fáze vybraného území byla manuálně obkreslena linií.

Každému polygonálnímu zrně byl následně přidělen bod s informací o minerální fázi. Výsledná síť byla převedena na polygony a jako výsledek vznikly kombinované mapy jednotlivých minerálních fází (Obr. 15).



Obr. 15. Mapa jednotlivých minerálních fází s ukázkou odlišných typů prvkových snímků použitých pro digitalizaci (vlevo) a dvou odlišných typů výstupních map – mapa linií a mapa bodů (vpravo dole). Mapa minerálních fází je kombinací těchto dvou výstupních map (ukázka na doméně z výbrusu se stádiem kliváže II.).

4.3 Kvantitativní analýza mikrostruktur

Data získaná digitalizací horninových mikrostruktur byla analyzována kvantitativní analýzou mikrostruktur pomocí PolyLX – MATLAB™ toolbox (Lexa, 2003).

Prvním krokem pro analyzování v PolyLX toolbox bylo načtení dat ve formátu .shp (shapefile) pomocí příkazu *shpread*. Škálování bylo provedeno pomocí „scaling factor“. „Scaling factor“ byl vypočten z měřítka digitalizované mapy v informačním systému QGIS, a to pomocí příkazu *trans2d*, který transformuje zrna pomocí transformační matice.

Z takto upravených dat bylo následně možno vynést velikost zrn jednotlivých minerálních fází (EAD – equal area diameter) pomocí příkazu *get*. Příkaz *pboxplot* byl využit k zobrazení distribuce těchto velikostí zrn minerálních fází pomocí boxplotů.

Pro určení tvarové přednostní orientace (SPO – shape preferred orientation) jednotlivých minerálních fází byl použit příkaz *gorten2*, který udává parametry kovarianční

matice rozloženého zrna/hranice. Růžicové diagramy s touto přednostní tvarovou orientací zrn a potřebné statistiky byly následně vyobrazeny pomocí příkazu *prosew*.

Příkaz *bmake* posloužil k vynesení hranic mezi jednotlivými zrny a *bsmooth* k jejich vyhlazení. Příkaz *surfor* byl využit k vypočtení síly stavby, jež odpovídá intenzitě přednostní orientace hranic zrn (SPO hranic zrn). Pomocí *surfor* byla taktéž získána orientace maxima.

Příkaz *svgwrite* (Scalable Vector Graphics) umožnil export ve vektorové grafice.

Všechny použité skripty pro analýzu v PolyLX toolbox jsou uvedeny na konci této práce, viz Přílohy.

4.4 Difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD)

Analýza EBSD byla provedena v Laboratoři skenovací elektronové mikroskopie na Ústavu petrologie a strukturní geologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Analyzování probíhalo na elektronovém mikroskopu Tescan Vega za urychlovacího napětí 20 kV, s 5 μm krokem a s proudem svazku 6 nA. Elektronový paprsek svíral se stolem úhel 70°. Data byla následně zpracována softwarem Aztec.

Dále byla data EBSD zpracovávána pomocí MATLABTM toolbox MTEX (Bachmann a Hielscher, 2005–2016), který slouží k analýze a modelování krystalografických textur. Data byla načítána ve formátu .ctf (Chanel Text File). Následně byla provedena rotace zobrazených map pomocí stupňů pro potřebnou orientaci vybraného území a korekce pomocí příkazu *mad* (<1,3). Pro řešení problému pseudometrie byla zkonstruována hranice zrn definovaná velikostí misorientace 10°. Byla odstaněna prázdná neindexovaná pole („not index“) a následovala rekonstrukce zrn bez těchto neindexovaných polí. Následně bylo provedeno další omezení pseudosymetrií, a to odstranění „twin boundaries“, nalezení „twin boundaries“ křemenných hranic s rotací 60 \pm 5 stupňů okolo c-osy a všech živcových hranic s rotací 180 \pm 5 stupňů okolo b-osy a sloučení zrn oddělených „twin boundaries“.

Všechny použité skripty pro analýzu si lze prohlédnout na konci této práce, viz Přílohy.

4.5 Rentgenová tomografie

Měření tomografie, s cílem získat 3D profil horniny, proběhlo v Laboratoři rentgenové tomografie na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR (ÚTAM AV ČR), Centrum excelence v Telči. Pro měření byl použit systém dvou-paprskové tomografie s využitím rentgenky XWT 160 TCHR s velikostí bodu 9 μm , za urychlovacího napětí 80 kV, proudu 300 μA a výkonu 24 W. Vymezený čas k měření byly 2 sekundy, než došlo k dalšímu

otočení rotačního stolku. Detektor Perkin Elmer s maticí pixelů 2048×2048 byl použit při zvětšení $60\times$.

5 Charakteristika odebraných vzorků granulitu Blanského lesa

Horniny pro výzkum byly odebrány z výchozu velkého několik metrů, který se nachází přibližně jeden kilometr na západo-jihozápad od Plešovického lomu s GPS koordináty 48.8640544°N , 14.3234150°E (systém WGS84). Byly odebrány dva vzorky s názvy OL1_Q a H296 (Obr. 16a, b) a následné pozorování bylo založeno na třech výbrusech vyhotovených z těchto dvou vzorků. Makroskopicky lze u vzorků odlišit dvě deformační stavby, kde S1 je definovaná subhorizontálním páskováním a střídáním křemenných pásků s pásy bohatými plagioklasem, granátem a porfyroklasty alkalických živců. Páskování S1 je protínáno kliváží S2 (Obr. 16a, b). Jedná se o krenulační až diskretní kliváž, která vede k desintegraci křemenných pásků.

Vzorek OL1_Q (Obr. 16a) se vyznačuje méně vyvinutou kliváží a byl použit pro zhotovení dvou orientovaných výbrusů ve dvou řezech, XZ a YZ. Řez XZ je paralelní s intersekční lineací a kolmý ke kliváží S2 a řez YZ je kolmý k intersekční lineaci, tj. kolmý ke kliváží S2 i páskování S1. Z druhého vzorku H296 (Obr. 16b), kde můžeme pozorovat stádium více vyvinuté kliváže oproti vzorku předchozímu, byl vyhotoven jeden výbrus YZ řezu, který je opět kolmý k intersekční lineaci (kolmý ke kliváží S2 i páskování S1). Stádium s méně vyvinutou kliváží bude v této práci nadále označováno jako **kliváž I.** (vzorek OL1_Q) a stádium s intenzivněji vyvinutou kliváží bude nadále označováno jako **kliváž II.** (vzorek H296).

5.1 Mikrostruktura a petrografie studovaných vzorků

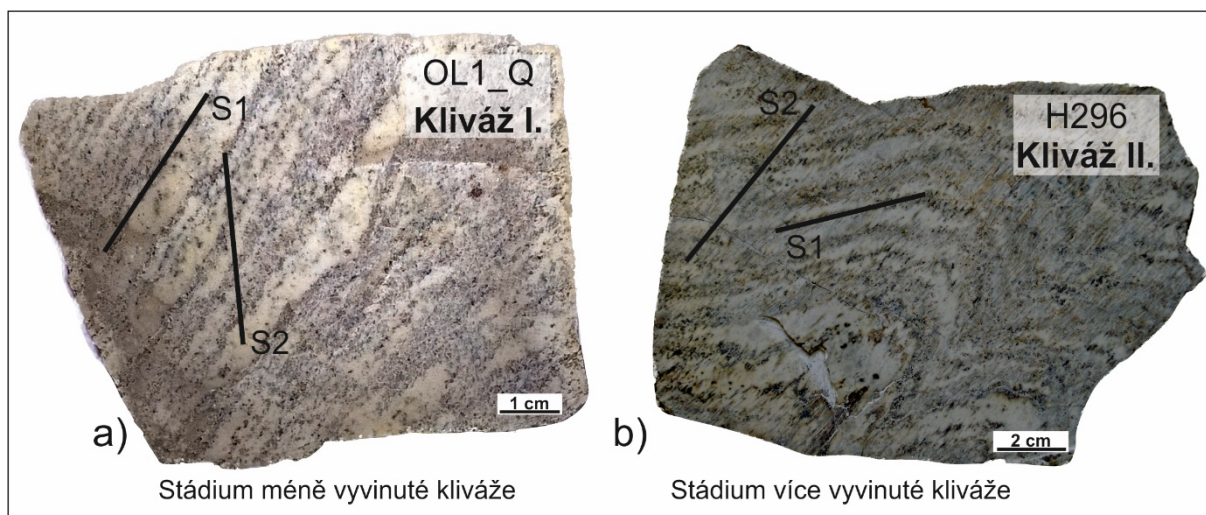
5.1.1 Stádium kliváže I. (YZ, XZ)

Ve výbrusech OL1_Q se v obou řezech vyskytují minerály kyanit, granát, K-živec, plagioklas, křemen, biotit, chlorit a akcesorické minerály.

Hojným minerálem je hypautomorfně omezený kyanit, jehož zrna podléhají procesu symplektitizace. Tato přeměna lze pozorovat od okrajů zrn kyanitu (Obr. 17a).

Ve frakturovaném granátu s automorfním až hypautomorfním omezením se hojně vyskytuje chlorit a lokálně dochází k prorůstání granátu s kyanitem (Obr. 17a, b).

K-živec se vyskytuje v matrix jako malá zrna, která jsou výrazně pertitická. Ve výbrusu



Obr. 16. Fotografie odebraných vzorků a jejich řezy použité pro zhotovení výbrusů. (a) Vzorek OL1_Q s hrubozrnnými křemennými pásy reprezentující stádium méně vyvinuté kliváže I. (b) Vzorek H296 s krenulační kliváží reprezentující stádium více vyvinuté kliváže II.

Lze pozorovat také velké porfýroklasty pertitu (Obr. 17c, 18c) s inkluzemi granátu a kyanitu. Pertitická zrna obsahují exoluční lamely s přednostní orientací a tyto lamely lze pozorovat ve formě tenkých „vláken“ a jako široké lamely (Obr. 17d). U pertitických zrn v matrix má exoluce tendenci být ve střezech zrn a u okrajů se nevyskytuje.

Plagioklas s xenomorfním omezením se vyskytuje v matrix jako malá zrna, zároveň obrůstá granáty a kyanit a vytváří okolo těchto zrn plagioklasové lemy (Obr. 17e, 18b, c). Plagioklas se vyskytuje také jako součást pertitu. Na kontaktu plagioklasu s draselným živcem vznikají okolo plagioklasu albitové lemy (Obr. 17c).

Hypautomorfně omezený biotit (Obr. 18a, b) je rozpadlý a lokálně se přeměňuje na chlorit. Lze pozorovat částečnou konzumaci granátu biotitem, tzn., že biotit vznikl později přeměnou granátu pravděpodobně v důsledku retrogrese granulitů.

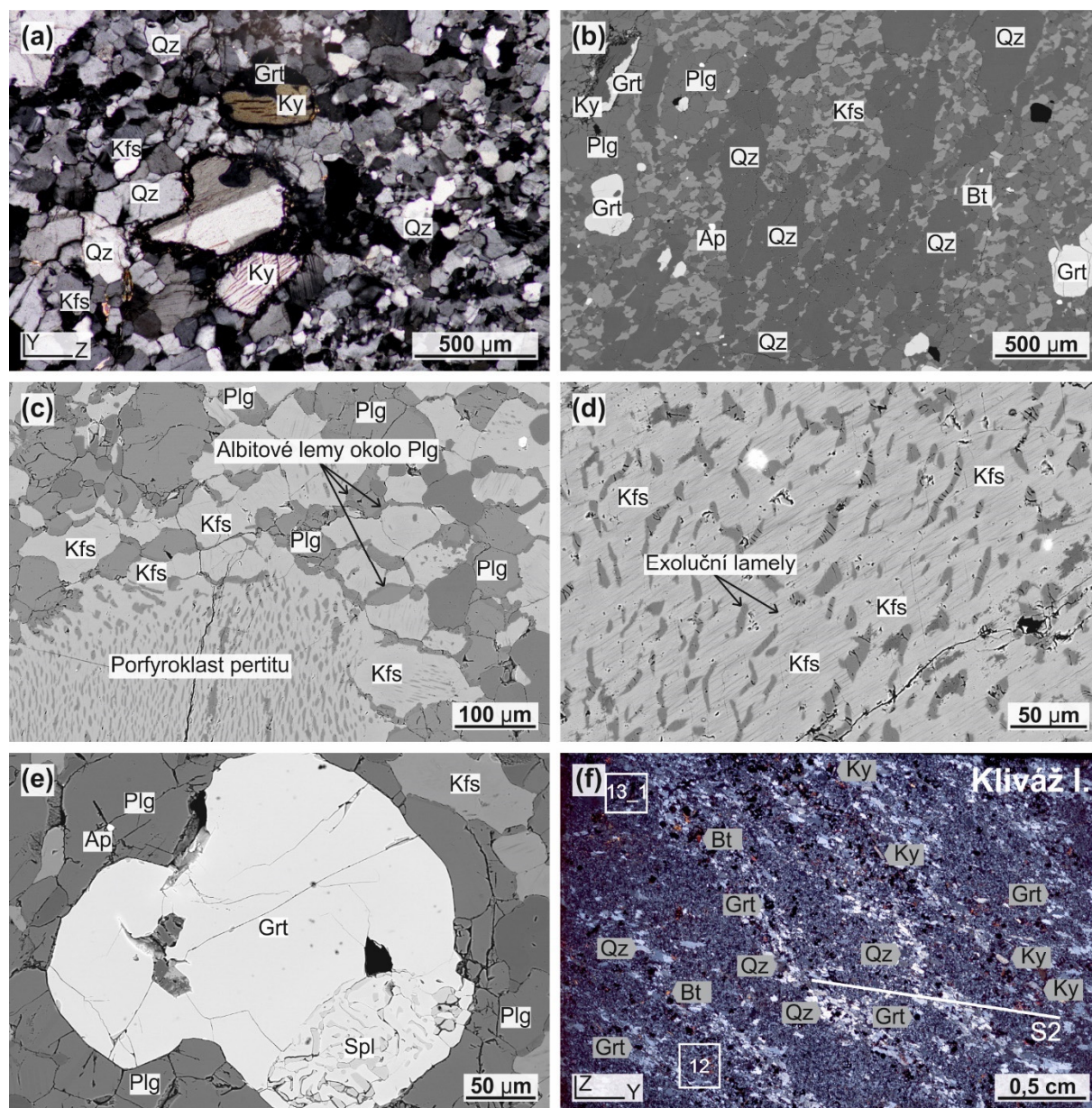
Ve výbrusu lze pozorovat spinel nahnědlé barvy způsobené oxidací, který se nachází v kyanitu, v okrajích zrn granátu (Obr. 17e) a také jako samostatná zrna. Hojný je výskyt zirkonu v biotitu, automorfně omezeného apatitu (Obr. 17e) a okolo rutilu lze pozorovat ilmenit. Lokálně se vyskytuje myrmekit.

Matrix je tvořena v největším zastoupení K-živcem, plagioklasem (Obr. 17c), dále lze pozorovat vtroušená zrna křemene a granátu.

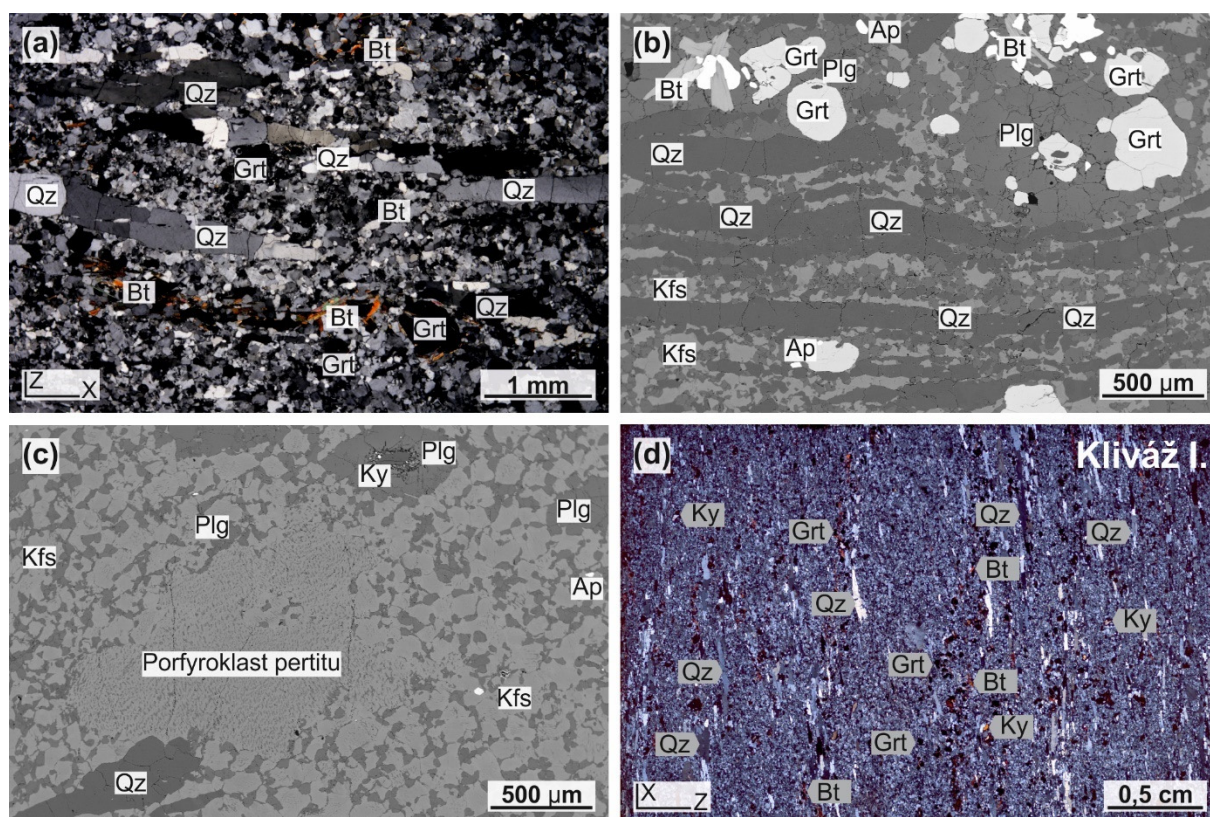
U výbrusu OL1_Q v YZ řezu můžeme pozorovat počáteční stádium přepracování S1 do jemnozrnné živcem dominující matrix spjaté s kliváží S2. Kliváž je nejlépe patrná v křemenných páscích, které protíná (Obr. 17f). Křemen ve formě hrubozrnných pásů uzavírá

živcové domény, jejichž přednostní orientace je paralelní s kliváží (Obr. 17b). Slabá přednostní tvarová orientace živcových zrn mimo křemenné pásy je orientovaná zhruba kolmo ke kliváží (Obr. 17b). Křemen se vyskytuje také v matrix jako drobná vmezežená zrna.

Pro výbrus v XZ řezu jsou typické křemenné ribony (žebra) s dlouhým osním poměrem (Obr. 18d), které jsou uzavřeny v jemnozrné živcové matrix.



Obr. 17. Kliváž I. v řezu YZ s hrubozrnnými křemennými pásy. (a) Mikrofotografie s jemnozrnnou matrix, prorůstání granátu s kyanitem a symplektitová struktura okolo kyanitu. (b) BSE snímek s křemennými pásy v jemnozrnné matrix. (c) BSE snímek s porfyroklastem pertitu a albitovými lemy okolo zrn plagioklasu. (d) BSE snímek pertitu s exolučními lamelami. (e) BSE snímek granátu se spinelem a plagioklasovým lemem. (f) Plocha celého výbrusu se zkříženými nikoly. Bílá čára značí orientaci kliváže.



Obr. 18. Kliváž I. v řezu XZ s křemennými ribony. (a) Mikrofotografie s křemennými ribony. (b) BSE snímek s jemnozrnnou matrix a plagioklasovým lemem okolo granátu. (c) BSE snímek s porfyroklastem pertitu a plagioklasovým lemem okolo kyanitu. (d) Plocha celého výbrusu se zkříženými nikoly.

5.1.2 Stádium kliváže II. (YZ)

Ve výbrusu H296 v YZ řezu se vyskytují minerály kyanit, granát, K-živec, plagioklas, křemen, biotit, chlorit a akcesorické minerály.

Granát s automorfním omezením je hojně frakturovaný, avšak některá zrna jsou zachovaná. Dochází k prorůstání granátu s kyanitem (Obr. 19a). Kyanit s hypautomorfně omezenými zrny se vyskytuje i samostatně a okolo jeho zrn lze pozorovat přeměnu ve formě symplektitové struktury.

K-živec tvoří v matrix malá pertitická zrna s exolučními lamelami a exoluce má tendenci být ve střezech zrn, nikoliv u okrajů (Obr. 19b). Exoluční lamely lze pozorovat ve formě tenkých „vláken“ a také jako široké lamely (Obr. 19c).

Plagioklas okolo svých zrn vytváří na kontaktu s K-živcem albitové lemy (Obr. 19c). Plagioklas se vyskytuje jako malá zrna v matrix, ve formě plagioklasových lemů okolo kyanitu (Obr. 19d) a granátu a zároveň také jako součást pertitů.

Biotit je zastoupen pouze výjimečně, a to pravděpodobně kvůli procesu mylonitizace, kdy chyběla fluida, a tím pádem mohl vznikat velice málo.

Ve výbrusu se vyskytují akcesorické minerály jako zirkon a automorfně omezený apatit. Okolo rutilu lze lokálně pozorovat ilmenit. Vzácný je výskyt myrmekitu.

Výbrus se vyznačuje dvěma deformacemi, kdy první deformace S1 je přetištěna intenzivní kliváží S2. Jemnozrnná živcem dominující matrix a rozdrobené minerály ukazují, že se jedná o mylonit, kde můžeme pozorovat intenzivní přeměnu.

Kliváž deformuje křemenné pásy uzavírající živcové domény (Obr. 19e, f) a přednostní tvarová orientace minerálů v těchto křemenných páscích je paralelní s kliváží. Přednostní tvarová orientace živcových zrn mimo křemenné pásy je orientovaná taktéž paralelně s kliváží (Obr. 19d). Křemen se vyskytuje také v matrix jako vmezeřená zrna.

Tmavé pásy táhnoucí se přes druhou polovinu výbrusu (Obr. 19f) jsou způsobeny alterací vzorku, avšak k analyzování byla použita pouze část výbrusu bez přeměny.

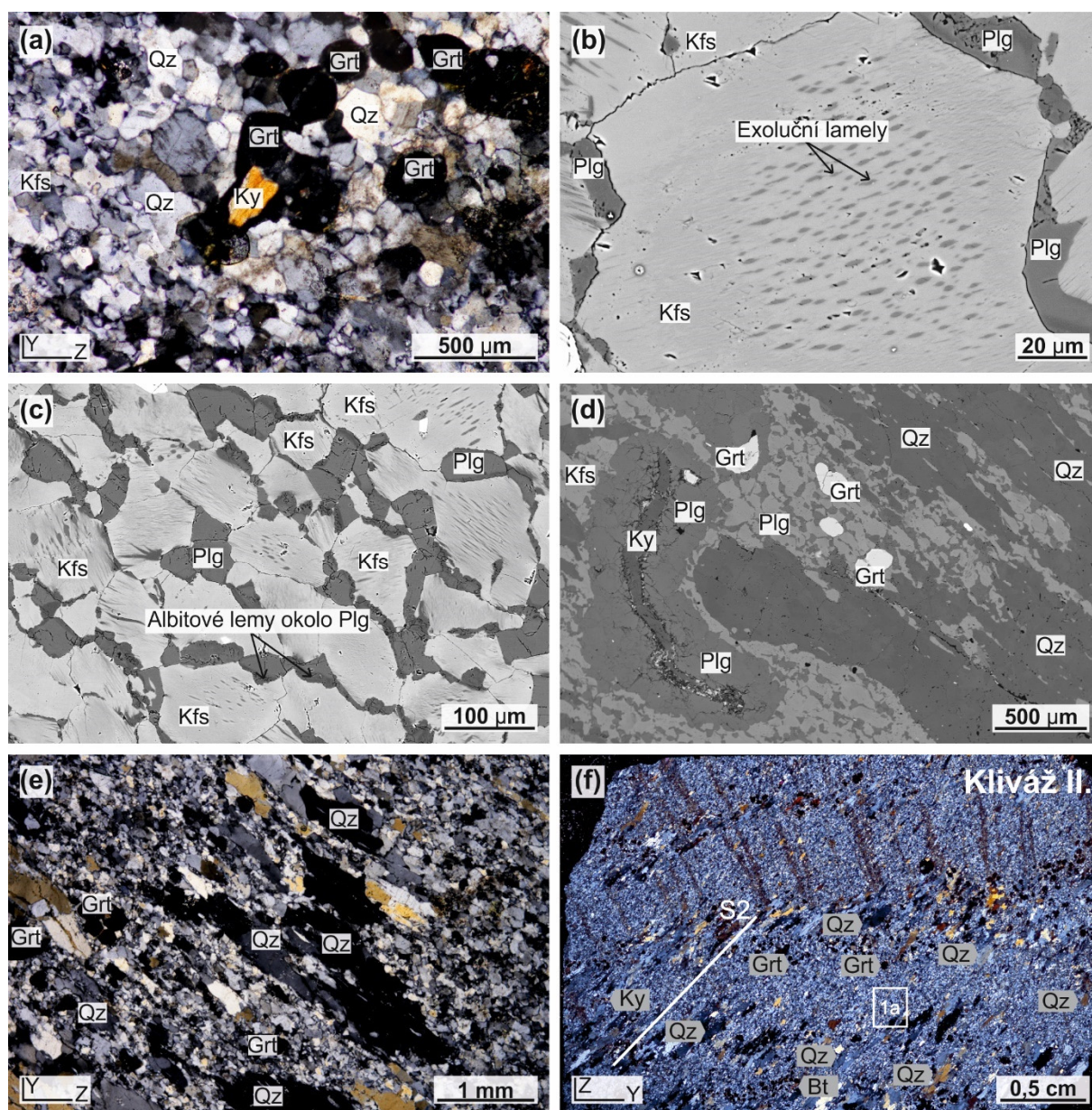
5.2 Chemická analýza živců

V této kapitole jsou blíže rozebrány dva zkoumané výbrusy z hlediska chemického složení živců, a to výbrus se stádiem kliváže I. v YZ řezu a výbrus se stádiem kliváže II. taktéž v YZ řezu.

5.2.1. Kliváž I.

U kliváže I. byly plošně analyzovány **porfyroklasty pertitu** (Obr. 20, 21a, b, c), pertity v matrix s širokými lamelami a pertity v matrix s úzkými lamelami. Pertit v matrix s širokými lamelami bude v této práci nadále označován jako **pertit v matrix I.** a pertit s úzkými lamelami bude nadále označován jako **pertit v matrix II.** (Obr. 20, 21a, b, c). Dále bylo plošně analyzováno **integrované složení dvouživcové matrix** (Obr. 20, 21a, b, c). Integrované složení dvouživcové matrix bylo měreno za účelem zjistit, zda chemismus odpovídá chemismu porfyroklastu pertitu, čímž by se dokázalo, že integrované složení dvouživcové matrix měrené plošnými analýzami odpovídá integrovanému složení původních ternárních živců.

U každého plošně analyzovaného zrna pertitu byl navíc bodově analyzován jeho draselný živec a exoluční lamela. U pertitu v matrix II. byl takto analyzován pouze draselný živec z důvodu úzkých exolučních lamel (Obr. 21a, b, c). Pro porovnání s chemickým složením živců vyskytujících se v matrix mimo křemenné pásy bylo také měreno několik bodových analýz zrn draselného živce a plagioklasu vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna přímo v doménách kliváže protínající křemenné pásy (Obr. 22).



Obr. 19. Kliváš II. v řezu YZ s hrubozrnnými křemennými pásy. (a) Mikrofotografie se vzájemným prorůstáním granátu s kyanitem. (b) BSE snímek pertitu s exolučními lamelami. (c) BSE snímek jemnozrnné matrix s albitovými lemy okolo zrn plagioklasu. (d) BSE snímek s plagioklasovým lemem okolo kyanitu. (e) Mikrofotografie s hrubozrnnými křemennými pásy a jemnozrnnou matrix. (f) Plocha celého výbrusu se zkříženými nikoly. Bílá čára značí orientaci kliváže.

Plošné analýzy kliváže I.

U porfýroklastu pertitu udává anortitová komponenta ze sedmi měření rozmezí 3,5–4,8 % An. Albitová komponenta udává rozmezí 25,6–33,9 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 62,0–69,7 %.

U pertitu v matrix I. ukazuje anortitová komponenta ze čtyř měření rozmezí 1,9–2,7 % An, albitová komponenta udává rozmezí 15,9–25,1 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 72,2–81,8 %.

U pertitu v matrix II. udává anortitová komponenta ze čtyř měření rozmezí 0,9–1,1 % An. Albitová komponenta je v rozmezí 10,4–18,2 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 80,7–88,6 %.

U integrovaného složení dvouživcové matrix udává anortitová komponenta ze čtyř měření rozmezí 3,8–6,1 % An. Albitová komponenta udává rozmezí 30,7–39,8 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 54,1–65,4 %.

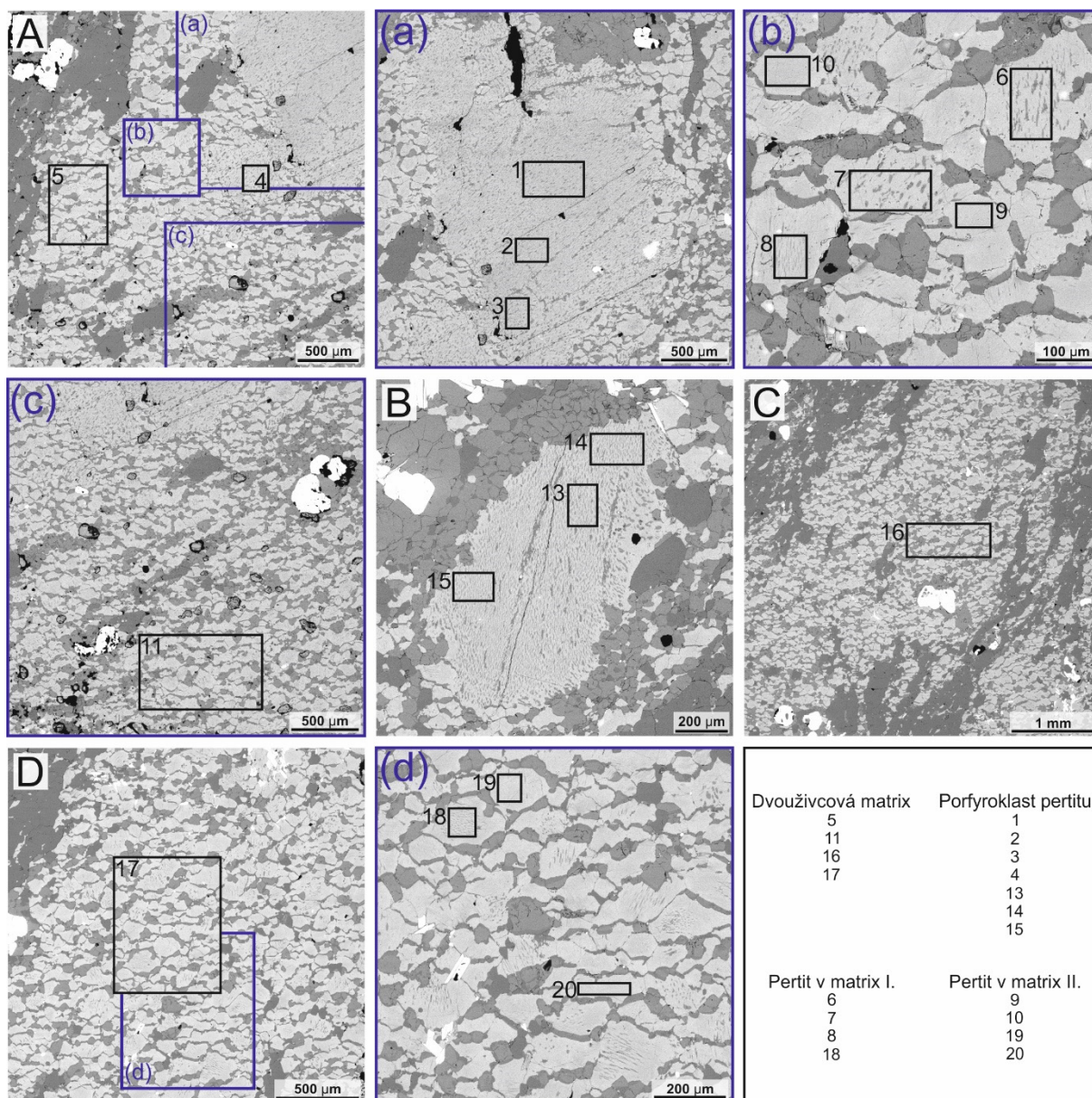
Bodové analýzy kliváže I.

U porfyroklastu pertitu udává exoluční lamela anortitovou komponentu ze sedmi měření v rozmezí 16,7–23,1 % An. Její albitová komponenta ukazuje na rozmezí 75,7–81,9 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 0,8–1,7 %. Draselný živec udává anortitovou komponentu ze sedmi měření v rozmezí 0,3–1,1 % An. Jeho albitová komponenta udává rozmezí 8,1–17,4 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 81,9–91,6 %.

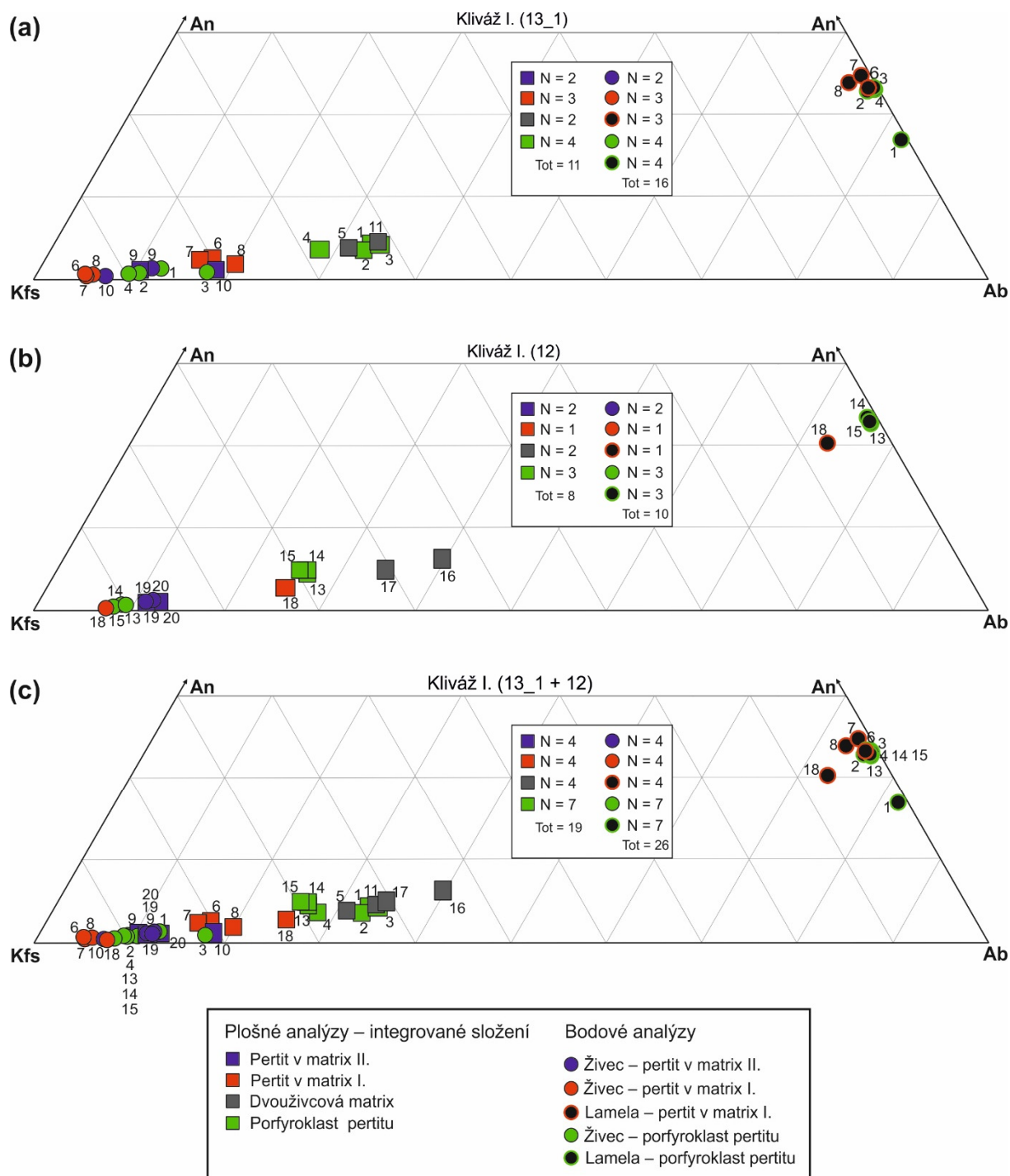
U pertitu v matrix I. udává exoluční lamela anortitovou komponentu ze čtyř měření v rozmezí 20,0–24,4 % An. Její albitová komponenta ukazuje rozmezí 73,1–75,6 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 1,4–6,9 %. Draselný živec udává anortitovou komponentu ze čtyř měření v rozmezí 0,2–0,3 % An. Jeho albitová komponenta ukazuje rozmezí 5,1–7,5 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 92,3–94,6 %.

U pertitu v matrix II. draselný živec udává anortitovou komponentu ze čtyř měření v rozmezí 0,2–1,1 % An. Jeho albitová komponenta ukazuje rozmezí 7,0–12,1 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 87,0–92,7 %.

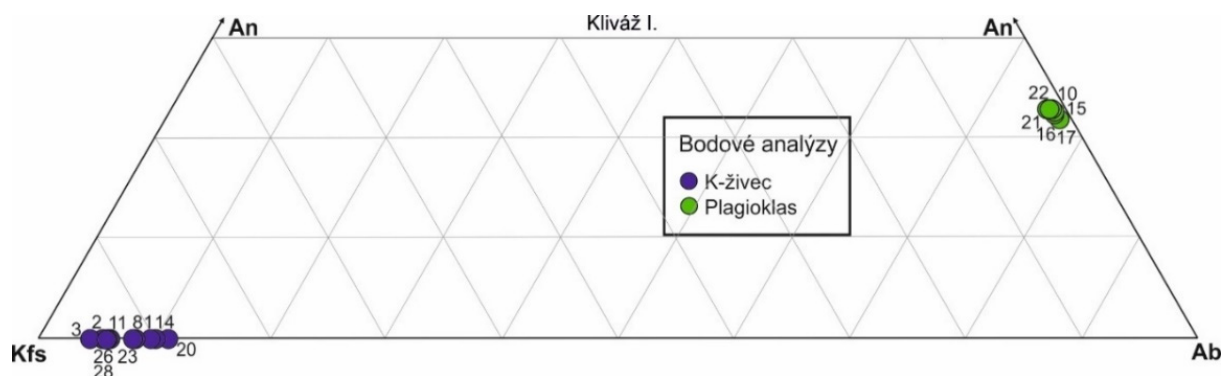
Bodové analýzy draselného živce vyskytujícího se ve dvouživcové matrix, která je přítomna přímo v doménách kliváže protínající křemenné pásy (Obr. 22), udávají, že anortitová komponenta je z deseti měření 0 % An. Albitová komponenta u tohoto draselného živce ukazuje rozmezí 4,5–11,2 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 88,8–95,5 %. U plagioklasu vyskytujícího se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže, udává anortitová komponenta ze šesti měření rozmezí 21,8–22,9 % An. Albitová komponenta ukazuje rozmezí 75,7–77,1 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 1,0–1,5 %.



Obr. 20. BSE snímky ze dvou částí výbrusu kliváže I. se černě vyznačenými obdélníky analyzovaných území a s čísly analýz. A: První část výbrusu (pracovně označena jako 13_1) s porfyroklastem pertitu a dvouživcovou matrix. B: Druhá část výbrusu (pracovně označena jako 12) s porfyroklastem pertitu. C, D: Jemnozrnná dvouživcová matrix (z druhé části výbrusu označené jako 12). Polohy těchto dvou částí zkoumaného výbrusu jsou pro lepší orientaci vyznačeny bílými čtverci v Obrázku 17f v předchozí kapitole Mikrostruktura a petrografie studovaných vzorků. (a, b, c, d) Jednotlivé zkoumané domény při větším zvětšení.



Obr. 21. Ternární diagramy s vynesnými chemismy živců z bodových (kruh) a plošných (čtverec) analýz ze dvou částí výbrusu (13_1 a 12) kliváže I. Ke každé plošné analýze perlitu patří dvě analýzy bodové označené shodnými čísly (draselný živec a exoluční lamela). (a) Diagram s chemismy živců z první části výbrusu (pracovně označena jako 13_1). (b) Diagram s chemismy živců z druhé části výbrusu (pracovně označena jako 12). (c) Diagram obsahující chemismy živců z obou částí výbrusu dohromady. N se rovná počet měření.



Obr. 22. Chemické složení živeců vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže protínající křemenné pásy kliváže I. Použité mikrosondové analýzy v ternárním diagramu lze nalézt v Tabulce 15 v Přílohách.

Reprezentativní mikrosondové analýzy živeců kliváže I. použité v této studii jsou uvedeny v Tabulkách 2 a 3.

Tab. 2. Reprezentativní mikrosondové analýzy živeců kliváže I. z oblasti 12.

Tab. 2: Reprezentativní mikrosondová analýza žilové kliváže 12 (tabulka 12)																		
Vzorek	Kliváž I.																	
Oblast	12																	
Minerál	Dvouživcová matrix		Porfyrroklast pertitu		Pertit v matrix I.		Pertit v matrix II.		Lamela				K-živec					
	Plošná analýza		Plošná analýza		Plošná analýza			Bodová analýza				Bodová analýza						
								Porfyrroklast pertitu				Pertit v matrix I.		Porfyrroklast pertitu		Pertit v matrix I.		Pertit v matrix II.
Analýza	16	17	13	14	18 kfs	19 kfs	20 kfs	13 lamela	14 lamela	15 lamela	18 lamela	13 kfs	14 kfs	15 kfs	18 kfs	19 kfs	20 kfs	
SiO ₂	65,223	64,581	63,865	63,064	64,380	64,459	64,666	61,781	61,243	61,478	62,164	63,350	63,354	63,272	63,440	63,322	63,170	
Al ₂ O ₃	18,829	19,016	19,162	19,053	18,905	18,501	18,521	22,660	22,613	22,602	22,063	18,173	18,250	18,227	18,227	18,227	18,327	
Fe ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,043	0,018	0,000	0,001	0,004	
FeO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,044	0,025	0,020	0,034	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
MgO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,009	0,001	0,010	0,000	0,008	
CaO	1,213	0,969	0,905	0,985	0,548	0,193	0,192	4,535	4,694	4,678	4,050	0,102	0,092	0,065	0,038	0,165	0,198	
Na ₂ O	4,381	3,888	2,996	2,942	2,866	1,292	1,439	8,602	8,533	8,662	8,207	1,072	1,030	0,912	0,843	1,258	1,364	
K ₂ O	9,048	10,395	11,935	11,787	12,531	15,055	14,773	0,217	0,189	0,201	1,168	15,644	15,357	15,619	15,741	14,912	14,942	
Total	98,694	98,848	98,862	97,831	99,231	99,500	99,592	97,839	97,305	97,641	97,686	98,357	98,135	98,114	98,299	97,885	98,013	
Si	2,999	2,967	2,944	2,938	2,959	2,979	2,984	2,800	2,790	2,789	2,827	2,962	2,972	2,970	2,973	2,974	2,960	
Al	1,020	1,030	1,041	1,046	1,024	1,008	1,008	1,210	1,214	1,209	1,183	1,002	1,009	1,008	1,007	1,009	1,012	
Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	
Fe ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	
Ca	0,060	0,048	0,045	0,049	0,027	0,010	0,010	0,220	0,229	0,227	0,197	0,005	0,005	0,003	0,002	0,008	0,010	
Na	0,390	0,346	0,268	0,266	0,255	0,116	0,129	0,756	0,754	0,762	0,724	0,097	0,094	0,083	0,077	0,115	0,124	
K	0,531	0,609	0,702	0,701	0,735	0,888	0,870	0,013	0,011	0,012	0,068	0,933	0,919	0,935	0,941	0,893	0,893	

Hodnoty jsou uvedeny v hm.%, která jsou přepočítána pomocí programu norm.

K-živec a plagioklas je přepočítán na 5 kationtů a 8 kyslíků.

Tab. 3. Reprezentativní mikrosondové analýzy živců kliváže I. z oblasti 13_1.

Vzorek			Kliváž I.																														
Oblast	13_1																																
Minerál	Dvouživcová matrix		Porfyrroklast pertitu					Pertit v matrix I.					Pertit v matrix II.					Lamela								K-živec							
	Plošná analýza		Plošná analýza					Plošná analýza					Bodová analýza								Bodová analýza												
													Porfyrroklast pertitu				Pertit v matrix I.				Porfyrroklast pertitu				Pertit v matrix I.				Pertit v matrix II.				
Analýza	5	11	1	2	3	4	6 kfs	7 kfs	8 kfs	9 kfs	10 kfs	1 lamela	2 lamela	3 lamela	4 lamela	6 lamela	7 lamela	8 lamela	1 kfs	2 kfs	3 kfs	4 kfs	6 kfs	7 kfs	8 kfs	9 kfs	10 kfs						
SiO ₂	64,104	64,456	64,524	64,499	64,534	64,188	64,485	64,226	64,590	64,227	64,846	62,723	61,420	61,594	61,374	61,672	61,349	62,435	63,491	63,571	63,339	63,228	63,476	63,084	63,076	63,453	62,840						
Al ₂ O ₃	18,992	18,711	18,980	19,238	19,252	19,085	18,814	18,739	18,774	18,402	18,696	21,326	22,727	22,764	22,737	22,742	23,102	22,921	18,212	18,314	18,153	18,291	18,129	18,006	17,993	18,378	18,232						
Fe ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,021	0,028	0,012	0,048	0,007	0,031	0,018	0,057						
FeO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,012	0,022	0,000	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						
MgO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,022	0,000	0,000	0,014	0,013	0,004	0,000	0,000	0,000						
CaO	0,780	0,894	0,897	0,712	0,845	0,751	0,513	0,475	0,402	0,201	0,230	3,449	4,569	4,609	4,714	4,673	4,950	4,817	0,221	0,116	0,143	0,076	0,054	0,039	0,058	0,226	0,046						
Na ₂ O	3,441	3,674	3,811	3,706	3,872	3,201	1,971	1,814	2,277	1,178	2,066	9,324	8,439	8,455	8,675	8,541	8,295	8,219	1,423	1,202	1,952	1,064	0,581	0,586	0,656	1,323	0,793						
K ₂ O	11,138	10,289	11,130	11,025	10,740	11,912	13,904	14,145	13,591	15,219	13,948	0,232	0,283	0,165	0,144	0,275	0,241	0,555	15,007	15,407	14,000	15,364	16,218	16,156	16,032	14,963	15,896						
Total	98,454	98,024	99,343	99,179	99,243	99,138	99,687	99,398	99,635	99,227	99,785	97,067	97,440	97,587	97,667	97,925	97,937	98,970	98,397	98,631	97,615	98,049	98,519	97,882	97,846	98,361	97,864						
Si	2,962	2,992	2,948	2,954	2,951	2,947	2,964	2,963	2,966	2,978	2,977	2,852	2,796	2,801	2,783	2,793	2,782	2,805	2,963	2,963	2,972	2,967	2,972	2,973	2,973	2,964	2,958						
Al	1,034	1,024	1,022	1,038	1,038	1,033	1,019	1,019	1,016	1,006	1,012	1,143	1,220	1,220	1,215	1,214	1,235	1,214	1,002	1,006	1,004	1,012	1,001	1,000	1,000	1,012	1,011						
Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001	0,002						
Fe ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000						
Ca	0,039	0,044	0,044	0,035	0,041	0,037	0,025	0,023	0,020	0,010	0,011	0,168	0,223	0,225	0,229	0,227	0,240	0,232	0,011	0,006	0,007	0,004	0,003	0,002	0,003	0,011	0,002						
Na	0,308	0,331	0,338	0,329	0,343	0,285	0,176	0,162	0,203	0,106	0,184	0,822	0,745	0,745	0,763	0,750	0,729	0,716	0,129	0,109	0,178	0,097	0,053	0,054	0,060	0,120	0,072						
K	0,657	0,609	0,649	0,644	0,626	0,698	0,815	0,832	0,796	0,900	0,817	0,013	0,016	0,010	0,008	0,016	0,014	0,032	0,893	0,916	0,838	0,920	0,969	0,971	0,964	0,892	0,954						

Hodnoty jsou uvedeny v hm.%, která jsou přepočítána pomocí programu norm.

K-živec a plagioklas je přepočítán na 5 kationtů a 8 kyslíků.

5.2.2 Kliváž II.

U kliváže II. byl plošně analyzován **pertit v matrix I., pertit v matrix II. a integrované složení dvouživcové matrix** (Obr. 23, 24).

U každého plošně analyzovaného zrna pertitu byl navíc bodově analyzován jeho draselný živec a exoluční lamela (v případě dostatečné šířky lamel). U pertitu v matrix II. byl analyzován pouze draselný živec z důvodu velice úzkých exolučních lamel (Obr. 24). Dále byly také bodově analyzovány živce vyskytující se ve dvouživcové matrix, která je přítomna přímo v doménách kliváže protínající křemenné pásy, a to pro porovnání s chemickým složením živců vyskytujících se v matrix mimo tyto křemenné pásy (Obr. 25).

U tohoto výbrusu nelze porovnávat chemismus porfyroklastu pertitu s chemismem integrovaného složení dvouživcové matrix z důvodu absence těchto porfyroklastů ve výbrusu.

Plošné analýzy kliváže II.

U pertitu v matrix I. ukazuje anortitová komponenta ze třech měření rozmezí 2,0–2,1 % An, albitová komponenta udává rozmezí 16,1–25,5 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 72,4–81,8 %.

U pertitu v matrix II. udává anortitová komponenta ze dvou měření rozmezí 0,8–1,4 % An. Albitová komponenta ukazuje rozmezí 10,7–15,9 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 82,7–88,5 %.

U integrovaného složení dvouživcové matrix udává anortitová komponenta ze dvou měření rozmezí 4,3–5,3 % An. Albitová komponenta ukazuje rozmezí 37,6–38,5 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 56,2–58,1 %.

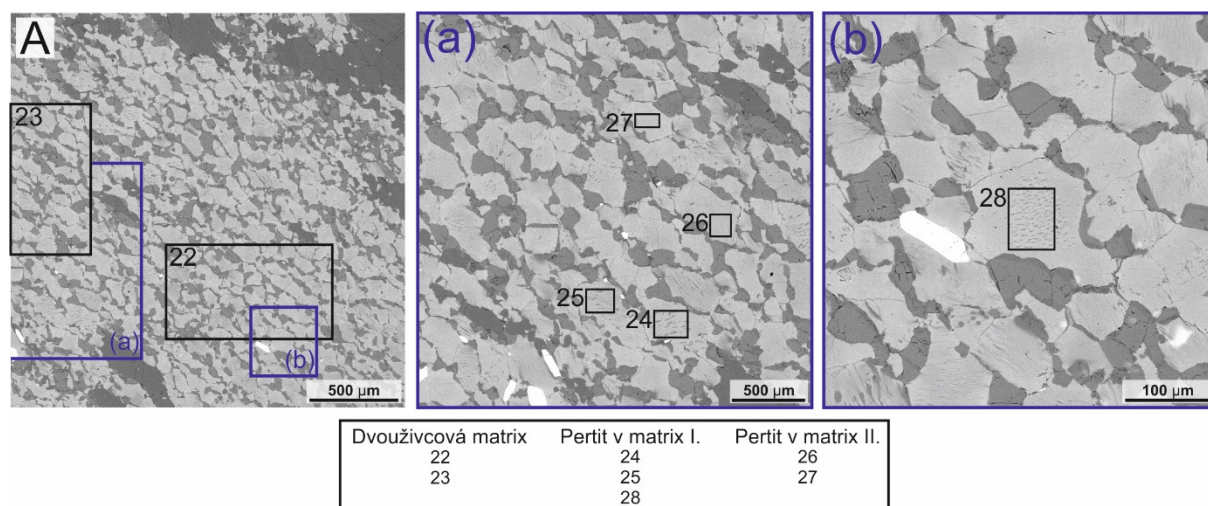
Bodové analýzy kliváže II.

U pertitu v matrix I. udává exoluční lamela anortitovou komponentu ze dvou měření v rozmezí 20,0–20,7 % An. Její albitová komponenta ukazuje rozmezí 77,4–78,1 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 1,1–2,6 %. Draselný živec udává anortitovou komponentu ze třech měření v rozmezí 0,3–1,0 % An. Jeho albitová komponenta ukazuje rozmezí 7,3–21,8 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 77,2–92,4 %.

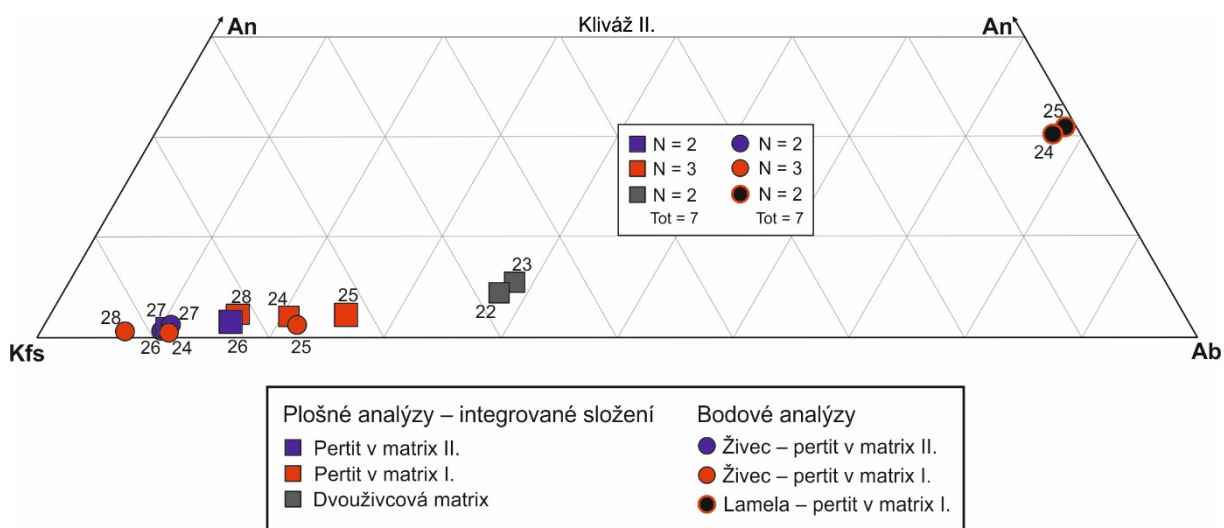
U pertitu v matrix II. draselný živec udává anortitovou komponentu ze dvou měření v rozmezí 0,4–0,8 % An. Jeho albitová komponenta ukazuje rozmezí 10,4–11,0 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 88,2–89,2 %.

U draselného živce vyskytujícího se ve dvouživcové matrix, která je přítomna přímo v doménách kliváže protínající křemenné pásy (Obr. 25), udává anortitová komponenta ze čtyř

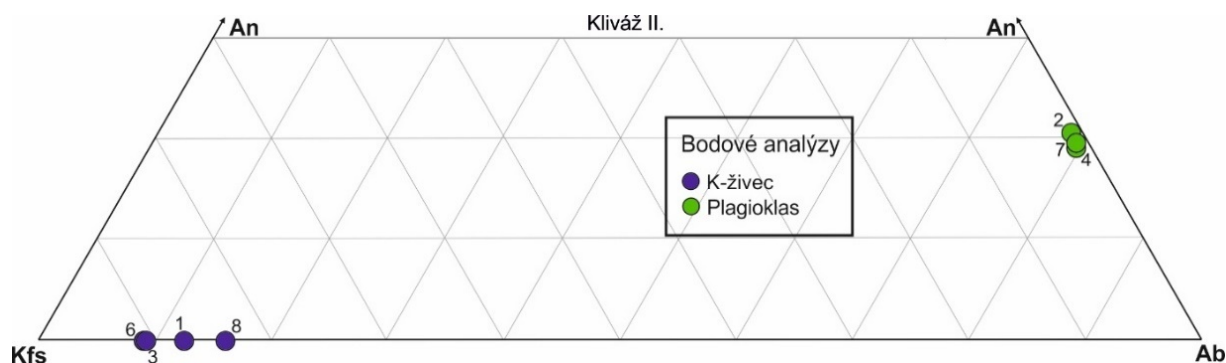
měření 0 % An. Albitová komponenta u tohoto draselného živce ukazuje rozmezí 9,0–15,9 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 84,1–91,0 %. U plagioklasu vyskytujícího se ve dvouživcové matrix přítomné v doménách kliváže udává anortitová komponenta ze třech měření rozmezí 19,1–20,7 % An. Albitová komponenta u tohoto plagioklasu ukazuje rozmezí 78,3–79,6 % Ab a draselno-živcová komponenta je v rozmezí 0,9–1,3 %.



Obr. 23. BSE snímky kliváže II. se černě vyznačenými obdélníky analyzovaných území a s čísly analýz. A: Jemnozrná dvouživcová matrix z části výbrusu pracovně označené jako 1a. Poloha této části výbrusu je vyznačena bílým čtvercem v Obrázku 19f v předchozí kapitole Mikrostruktura a petrografie studovaných vzorků. (a, b) Jednotlivé zkoumané domény při větším zvětšení.



Obr. 24. Ternární diagram s vyneseními chemismy živců z bodových (kruh) a plošných analýz (čtverec) z části výbrusu 1a kliváže II. K plošné analýze pertitu patří dvě analýzy bodové označené shodnými čísly (draselný živec a exoluční lamela). N se rovná počet měření.



Obr. 25. Chemické složení živců vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže protínající křemenné pásy kliváže II. Použité mikrosondové analýzy v ternárním diagramu lze nalézt v Tabulce 16 v Přílohách.

Reprezentativní mikrosondové analýzy živců kliváže II. použité v této studii jsou prezentovány v Tabulce 4.

Tab. 4. Reprezentativní mikrosondové analýzy živců kliváže II.

Vzorek Minerál	Kliváž II.													
	Dvouživcová matrix		Pertit v matrix I.		Pertit v matrix II.		Lamela		K-živec					
	Plošná analýza		Plošná analýza		Plošná analýza		Bodová analýza		Bodová analýza					
							Pertit v matrix I.		Pertit v matrix I.		Pertit v matrix II.			
Analýza	22	23	24 kfs	25 kfs	28 kfs	26 kfs	27 kfs	24 lamela	25 lamela	24 kfs	25 kfs	28 kfs	26 kfs	27 kfs
SiO ₂	63,554	62,954	64,369	64,658	63,562	64,050	63,697	62,180	61,820	63,399	63,513	63,157	63,102	63,387
Al ₂ O ₃	18,874	18,844	19,267	19,064	18,487	18,480	18,375	22,355	22,693	18,170	18,325	18,259	18,293	18,317
Fe ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,023	0,000	0,000	0,000	0,029
FeO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
MgO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,010	0,004	0,000	0,026
CaO	0,865	1,053	0,411	0,436	0,416	0,280	0,162	4,072	4,314	0,070	0,205	0,055	0,082	0,154
Na ₂ O	4,179	4,238	2,327	2,878	1,798	1,797	1,181	8,729	8,983	1,248	2,491	0,827	1,177	1,237
K ₂ O	9,818	9,403	13,389	12,416	13,864	14,210	14,886	0,445	0,196	15,079	13,402	15,951	15,337	15,009
Total	97,291	96,492	99,763	99,452	98,126	98,817	98,300	97,790	98,018	97,989	97,946	98,253	97,991	98,159
Si	2,960	2,955	2,950	2,966	2,971	2,972	2,982	2,816	2,788	2,975	2,960	2,960	2,960	2,969
Al	1,036	1,043	1,041	1,031	1,019	1,011	1,014	1,193	1,206	1,005	1,007	1,009	1,011	1,011
Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001
Fe ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002
Ca	0,043	0,053	0,020	0,021	0,021	0,014	0,008	0,198	0,208	0,004	0,010	0,003	0,004	0,008
Na	0,377	0,386	0,207	0,256	0,163	0,162	0,107	0,766	0,785	0,114	0,225	0,075	0,107	0,112
K	0,583	0,563	0,783	0,726	0,827	0,841	0,889	0,026	0,011	0,902	0,797	0,954	0,918	0,897

Hodnoty jsou uvedeny v hm.%, která jsou přepočítána pomocí programu norm.

K-živec a plagioklas je přepočítán na 5 kationtů a 8 kyslíků.

5.3 Živcová termometrie pro výpočet rovnovážné teploty živců

Výpočty rovnovážných teplot pro určení vzniku jednotlivých generací pertitů byly provedeny pomocí programu SolvCalc (Wen a Nekvasil, 1994). Pro solvní živcovou termometrii se využívá koexistence dvou živců – plagioklasu a alkalického živce. Tento program umožňuje výpočet solvu ternárního živce a rovnovážné teploty koexistujících párů živců.

Program zahrnuje šest různých termodynamických modelů. Pro účely výzkumu byl vybrán model Fuhrman a Lindsley (1988). Z formulace termometru lze vypočíst 3 teploty (T_{Ab} , T_{Kfs} , T_{An}), které jsou v ideálním případě totožné nebo alespoň velmi blízké – v tomto případě přibližně odpovídají rovnovážné teplotě a je z nich vypočten průměr. Algoritmus použitý ve Fuhrman a Lindsley (1988) zadaná složení mírně modifikuje za účelem dostat co nejvhodnější trojici teplot. Pro vypočtení solvu za účelem zjištění maximálních teplot byl mimo předchozí model použit také model Benisek et al. (2010).

V této práci uvažují několik stádií rozpadu živců a vzniku exolučních lamel, a proto jsou pro výpočet využívána složení živců z odpovídajících mikrostrukturních pozic. Rovnovážné teploty byly počítány od předpokládaných nejvyšších teplot, tzn. od živců ternárních, a byly spočítány pro tlaky 12 kbar, 15 kbar a 18 kbar (viz P-T dráha Fraňek et al., 2011b), protože konkrétní tlakové podmínky související se vznikem exolučních lamel nejsou známy. Jednotlivá předpokládaná stadia jsou nadále označována jako (0), (1), (2) a (3).

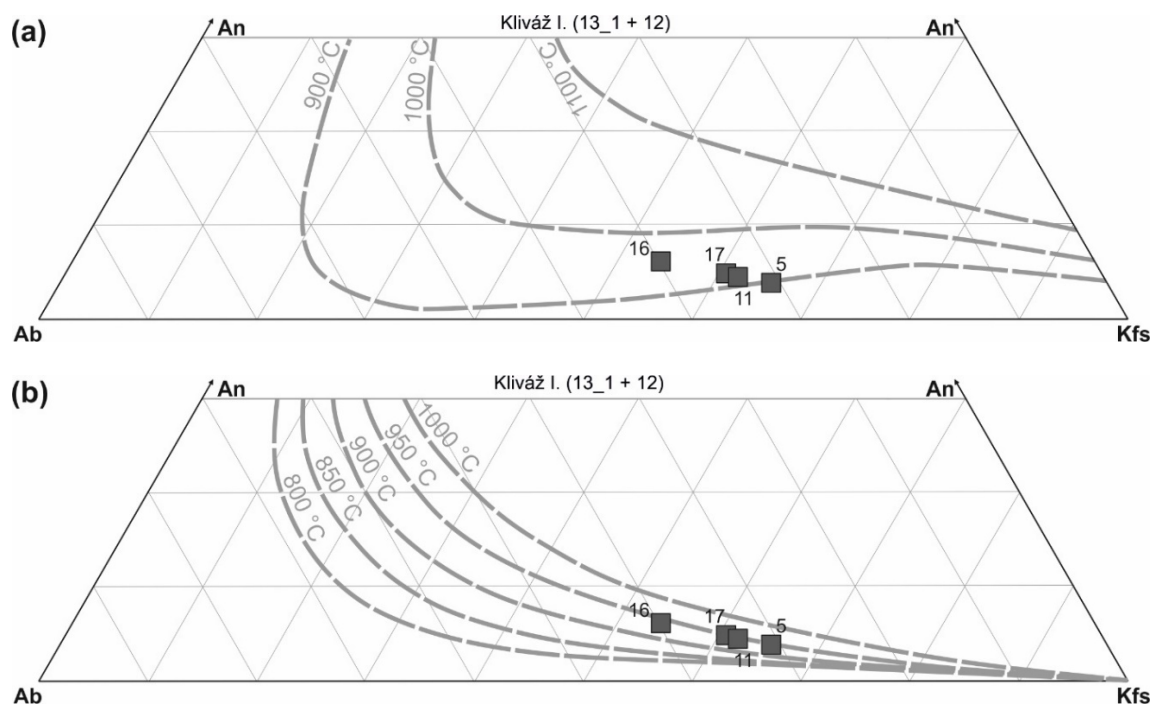
Pro výpočet maximálních teplot bylo využito integrovaného složení dvouživcové matrix. Pro výpočet rovnovážných teplot koexistujících zrn draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix byly použity plošné analýzy pertitu v matrix I. v kombinaci s bodovými analýzami zrn plagioklasu a pro výpočet rovnovážných teplot porfyrroklastu pertitu bylo využito bodových analýz jeho draselného živce a exoluční lamely. U pertitu v matrix I. bylo pro výpočet použito taktéž bodových analýz jeho draselného živce a exoluční lamely.

5.3.1 Živcová termometrie – kliváž I.

(0) *Výpočet maximálních teplot pomocí solvu pro ternární živec*

Pro tyto výpočty bylo použito integrované složení dvouživcové matrix č. 5, 11, 16, 17 (Obr. 26a, b) měřené plošnými analýzami, které odpovídá integrovanému složení původních ternárních živců.

Výpočty ukazují, že ternární živec byl stabilní za vysokých teplot v rozsahu 900–950 °C za tlaků 15 kbar podle modelu Fuhrman a Lindsley (1988; Obr. 26a). Model Benisek et al. (2010) pro 18 kbar ukazuje teploty o trochu vyšší (Obr. 26b).



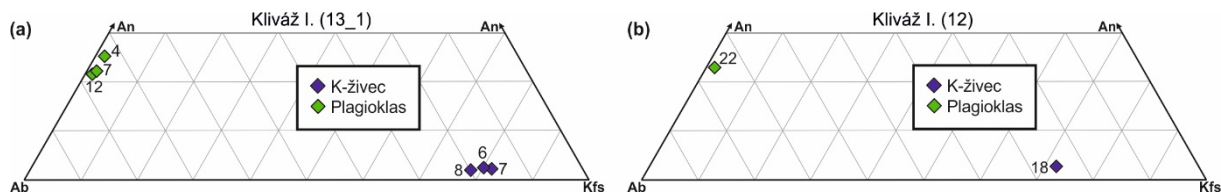
Obr. 26. Ternární diagramy kliváže I. pro výpočet maximálních teplot. (a) Integrované složení dvouživcové matrix s teplotními izopletami vypočítanými pomocí Fuhrman a Lindsley (1988) pro 15 kbar. (b) Integrované složení dvouživcové matrix s teplotními izopletami vypočítanými pomocí modelu Benisek et al. (2010) pro 18 kbar.

(1) Výpočet rovnovážných teplot pro koexistující zrna draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix

Pro výpočet byly použity plošné analýzy pertitu v matrix I. v kombinaci s bodovými analýzami zrn plagioklasu.

Výpočty ukazují, že koexistující zrna draselného živce a plagioklasu z oblastí 13_1 a 12 ve výbrusu s chemickým složením viz Obrázek 27 mají rovnovážné teploty mezi 769–645 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar (Tab. 5).

Názvy analýz a všechny vypočítané rovnovážné teploty koexistujících kombinací párů, které byly použity pro výpočty, jsou zobrazeny v Tabulce 5 a jejich chemismy v Obrázku 27a, b.



Obr. 27. Chemické složení koexistujících kombinací párů draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix ze dvou oblastí v kliváži I. (a) Oblast 13_1 a (b) oblast 12. Použité mikrosondové analýzy zrn plagioklasu lze nalézt v Tabulce 17 v Přílohách.

Tab. 5. Vypočtené rovnovážné teploty zrn draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix kliváže I.

Kliváž I. (13_1)		°C		
Kombinace párů		12 kbar	15 kbar	18 kbar
Plošná analýza	Bodová analýza			
6 kfs	4 plg	664	693	731
7 kfs	7 plg	645	662	696
8 kfs	12 plg	677	711	733
Kliváž I. (12)		°C		
Kombinace párů		12 kbar	15 kbar	18 kbar
Plošná analýza	Bodová analýza			
18 kfs	22 plg	728	750	769

(2) *Výpočet rovnovážných teplot pro porfyroklast pertitu*

Pro výpočet těchto rovnovážných teplot bylo využito bodových analýz draselného živce a exoluční lamely porfyroklastu pertitu.

Výpočty rovnovážných teplot pro porfyroklasty pertitu s chemickým složením viz Obrázek 28 z oblastí 13_1 a 12 ve výbrusu se pohybují mezi 685–528 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar (Tab. 6).

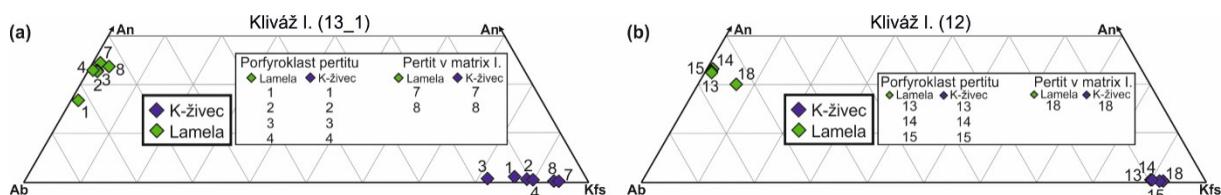
Názvy analýz a všechny vypočítané rovnovážné teploty, které byly použity pro výpočty, jsou zobrazeny v Tabulce 6 a jejich chemismy v Obrázku 28a, b.

(3) *Výpočet rovnovážných teplot pro pertit v matrix I.*

Pro určení těchto rovnovážných teplot bylo využito bodových analýz draselného živce a exoluční lamely pertitu v matrix I.

Pro pertit v matrix I. s chemickým složením viz Obrázek 28 byla vypočítána rovnovážná teplota mezi 525–460 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar (Tab. 6).

Názvy analýz a všechny vypočítané rovnovážné teploty, které byly použity pro výpočty, jsou zobrazeny v Tabulce 6 a jejich chemismy v Obrázku 28a, b.



Obr. 28. Chemické složení draselného živce a exoluční lamely porfyroklastu pertitu a pertitu v matrix I. ze dvou oblastí v kliváži I. (a) Oblast 13_1 a (b) oblast 12.

Tab. 6. Vypočtené rovnovážné teploty porfyroklastu pertitu a pertitu v matrix I. kliváže I.

Kliváž I. (13_1)		°C			Popis zrna
Kombinace párů		12 kbar	15 kbar	18 kbar	
Bodová analýza	Bodová analýza				
1 lamela	1 kfs	593	605	624	Jeden porfyroklast pertitu
2 lamela	2 kfs	587	614	612	
3 lamela	3 kfs	641	665	685	
4 lamela	4 kfs	560	561	588	Porfyroklast pertitu
7 lamela	7 kfs	460	477	483	Pertit v matrix I.
8 lamela	8 kfs	477	516	525	Pertit v matrix I.
Kliváž I. (12)		°C			Popis zrna
Kombinace párů		12 kbar	15 kbar	18 kbar	
Bodová analýza	Bodová analýza				
13 lamela	13 kfs	569	591	592	Jeden porfyroklast pertitu
14 lamela	14 kfs	559	587	595	
15 lamela	15 kfs	528	536	576	
18 lamela	18 kfs	500	507	510	Pertit v matrix I.

5.3.2 Živcová termometrie – kliváž II.

Pro tento výbrus byl zvolen stejný princip výběru koexistujících párů živců jako u výbrusu předchozího, tzn. jako u kliváže I.

(0) Výpočet maximálních teplot pomocí solvu pro ternární živec

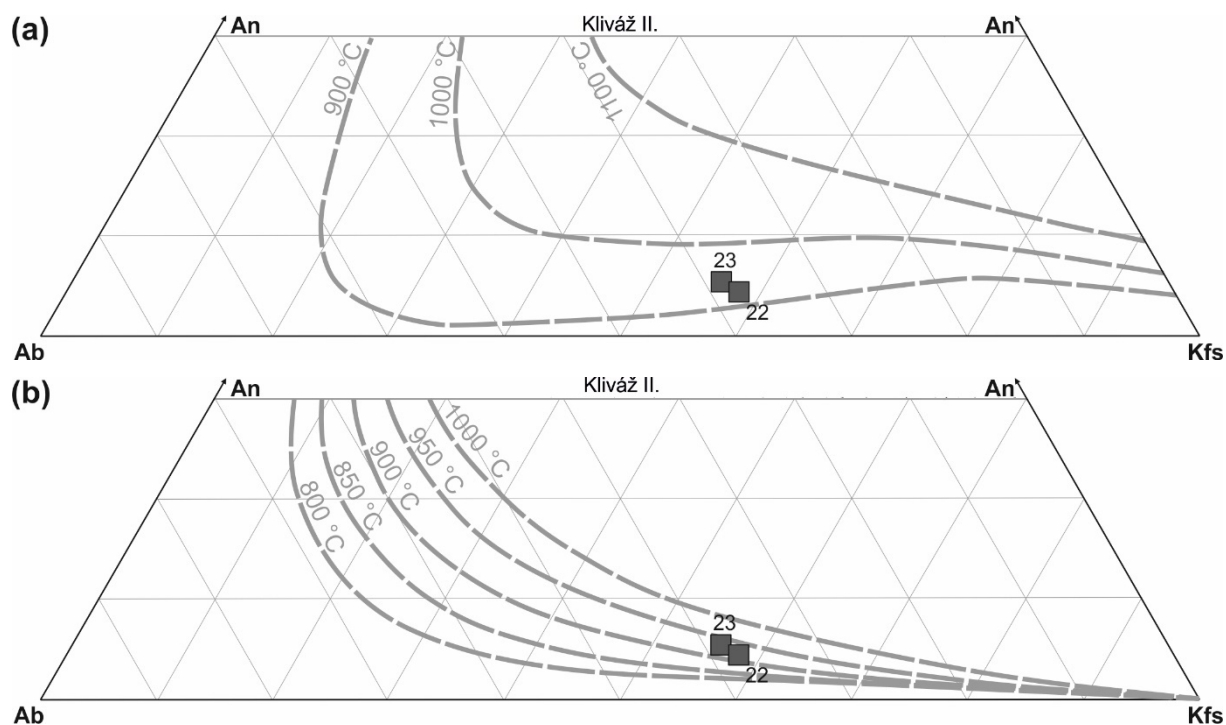
Pro tyto výpočty bylo použito integrované složení dvouživcové matrix č. 22, 23 (Obr. 29a, b) měřené plošnými analýzami, které odpovídá integrovanému složení původních ternárních živců.

Výpočty ukazují, že živec byl stabilní za velmi vysokých teplot v rozsahu zhruba 920–940 °C za tlaků 15 kbar podle modelu Fuhrman a Lindsley (1988; Obr. 29a). Model Benisek et al. (2010) pro 18 kbar odhaluje teploty zhruba podobné (Obr. 29b).

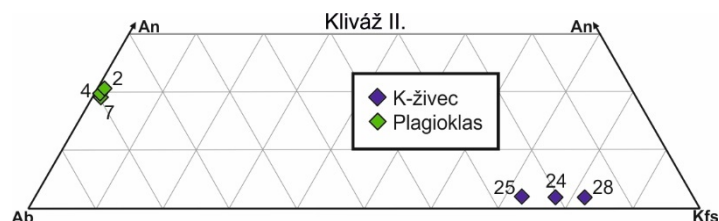
(1) Výpočet rovnovážných teplot pro koexistující zrna draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix

Vypočtené hodnoty udávají, že koexistující zrna draselného živce a plagioklasu z oblasti 1a ve výbrusu s chemickým složením viz Obrázek 30 mají rovnovážné teploty mezi 755–621 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar (Tab. 7).

Názvy a všechny vypočítané rovnovážné teploty koexistujících kombinací párů, které byly použity pro výpočty, jsou zobrazeny v Tabulce 7 a jejich chemismy v Obrázku 30.



Obr. 29. Ternární diagramy kliváže II. pro výpočet maximálních teplot. (a) Integrované složení dvouživcové matrix s teplotními izoplety vypočítanými pomocí Fuhrman a Lindsley (1988) pro 15 kbar. (b) Integrované složení dvouživcové matrix s teplotními izoplety vypočítanými pomocí modelu Benisek et al. (2010) pro 18 kbar.



Obr. 30. Chemické složení koexistujících kombinací párů draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix z oblasti 1a v kliváži II. Použité mikrosondové analýzy zrn plagioklasu lze nalézt v Tabulce 17 v Přílohách.

Tab. 7. Vypočtené rovnovážné teploty zrn draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix kliváže II.

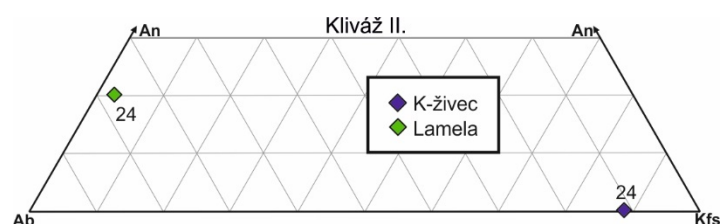
Kliváž II.		°C		
Kombinace párů		12 kbar	15 kbar	18 kbar
Plošná analýza	Bodová analýza			
24 kfs	2 plg	675	700	728
25 kfs	4 plg	705	731	755
28 kfs	7 plg	621	644	664

(3) Výpočet rovnovážných teplot pro pertit v matrix I.

V tomto výbrusu můžeme provádět výpočty rovnovážných teplot pro pertit v matrix I., nikoliv však pro porfyroklast pertitu z důvodu jeho absence ve výbrusu.

Vypočítané rovnovážné teploty pro pertit v matrix I. s chemickým složením viz Obrázek 31 se pohybují v rozmezí 627–553 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar (Tab. 8).

Názvy a vypočítané rovnovážné teploty koexistující kombinace páru, která byla použita pro výpočty, jsou zobrazeny v Tabulce 8 a chemismy koexistující kombinace tohoto páru jsou zobrazeny v Obrázku 31.



Obr. 31. Chemické složení draselného živce a exoluční lamely pertitu v matrix I. z oblasti 1a v kliváži II.

Tab. 8. Vypočtené rovnovážné teploty pertitu v matrix I. kliváže II.

Kliváž II.		°C			Popis zrna
Kombinace párů		12 kbar	15 kbar	18 kbar	
Bodová analýza	Bodová analýza				
24 lamela	24 kfs	553	565	627	Pertit v matrix I.

5.3.3 Shrnutí výsledků živcové termometrie pro výpočet rovnovážné teploty živců

Z vypočítaných výsledků živcové termometrie lze rozlišit tři stádia rozpadu živců.

(0) *Nulté stádium*: Rovnovážná teplota původních ternárních živců se podle vypočítaných hodnot u kliváže I. pohybuje zhruba mezi 900–950 °C pro 15 kbar podle modelu Fuhrman a Lindsley (1988) a okolo 950 °C podle Benisek et al. (2010) pro 18 kbar. U kliváže II. se rovnovážná teplota pohybuje mezi 920–940 °C pro oba modely.

(1) *První stádium*: První rozpad nastává za vysokých teplot, kdy se část ternárních živců rozpadá na jednotlivá zrna draselného živce a zrna plagioklasu ve dvouživcové matrix. U kliváže I. se rovnovážné teploty těchto zrn draselných živců a plagioklasu ve dvouživcové matrix pohybují mezi 769–645 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar. U kliváže II. výpočty uvádí rovnovážné teploty 755–621 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar.

(2) *Druhé stádium*: Později za nižších teplot dochází během druhého stádia k rozpadu zbytkových porfyroklastů ternárních živců na pertity s exolučními lamelami, tzn., že tyto

zbytkové ternární živce podléhají pertitizaci. U kliváže I. se rovnovážné teploty pro porfyroklasty pertitu pohybují mezi 685–528 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar. U kliváže II. nemohlo být zkoumáno z důvodu absence porfyroklastu pertitu ve výbrusu.

(3) *Třetí stádium:* Během třetího stádia se začíná rozpadat draselný živec ve dvouživcové matrix. Tento draselný živec začne při poklesu teploty vytvářet pertitové odmíšeniny a vzniká další pertit. U kliváže I. se rovnovážné teploty pro pertit v matrix I. pohybují mezi 525–460 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar. U kliváže II. výpočty uvádí rovnovážné teploty pertitu v matrix I. 627–553 °C pro tlakové rozmezí 18–12 kbar.

6 Kvantitativní mikrostrukturní analýza

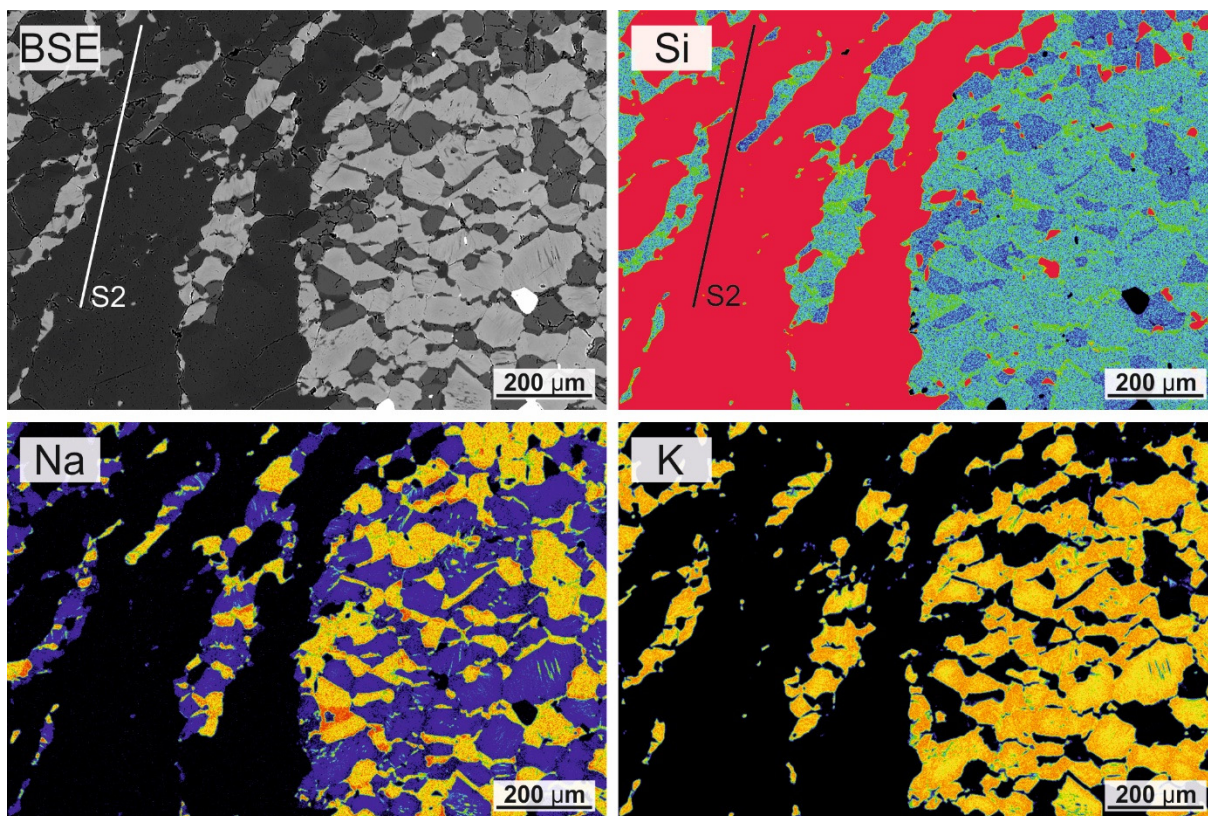
V této kapitole jsou blíže rozebrány dva zkoumané výbrusy (výbrus se stádiem kliváže I. v YZ řezu a výbrus se stádiem kliváže II. také v YZ řezu) za pomoci manuálně překreslených map jednotlivých minerálních fází, které byly následně digitalizovány. Dvě digitalizované kombinované mapy (mapa 1, mapa 3) byly vytvořeny ze snímků výbrusu se stádiem kliváže I. a jedna kombinovaná mapa (mapa 2) byla vytvořena z výbrusu se stádiem kliváže II.

Pomocí těchto digitalizovaných map byla zkoumána distribuce velikosti zrn minerálních fází, přednostní tvarová orientace zrn jednotlivých minerálních fází (SPO zrn; SPO – shape preferred orientation), přednostní tvarová orientace kontaktů hranic zrn (SPO hranic zrn) a síla přednostní tvarové orientace hranic zrn původní matrix s absencí plagioklasových (albitových) lemů.

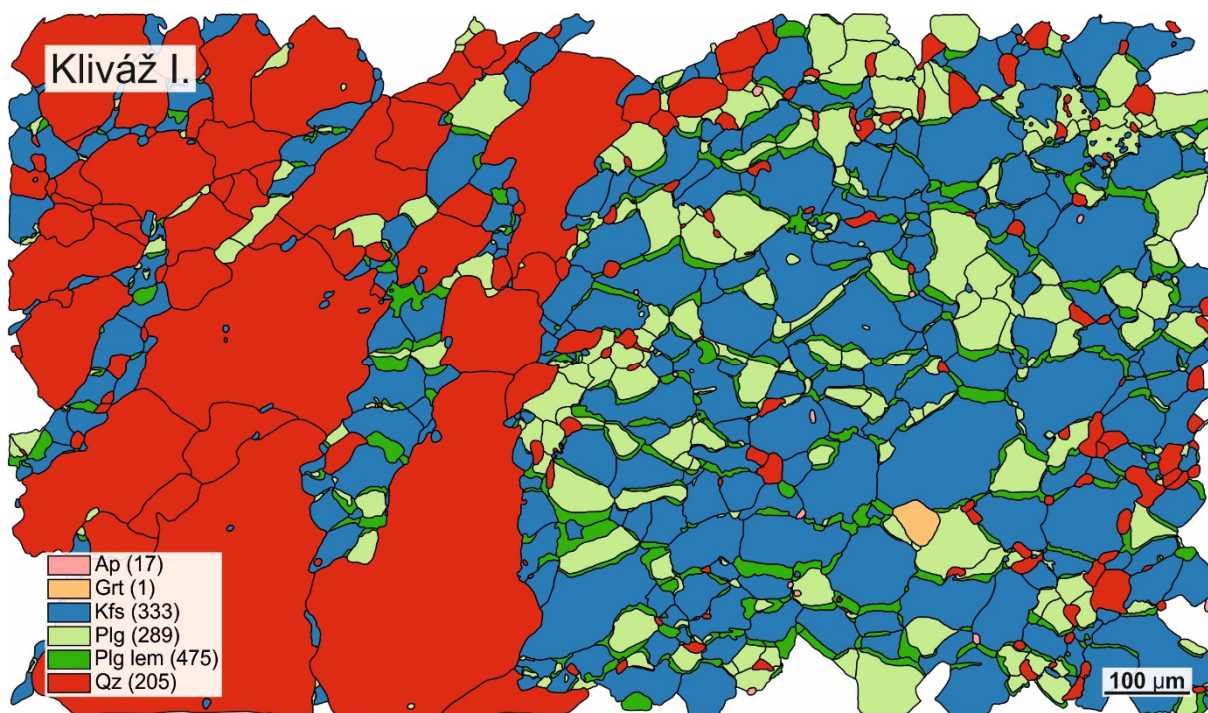
6.1 Kliváž I. – mapa 1

Výběr některých prvkových map, které byly použity pro vytvoření mapy 1, jsou pro porovnání s digitalizovanou mapou 1 vyobrazeny v Obrázku 32. Území této digitalizované mapy 1 (Obr. 33) bylo vybráno kvůli mikrostrukturním vztahům mezi hrubozrnným křemenným pásem a vznikající kliváží a kvůli dvouživcové matrix.

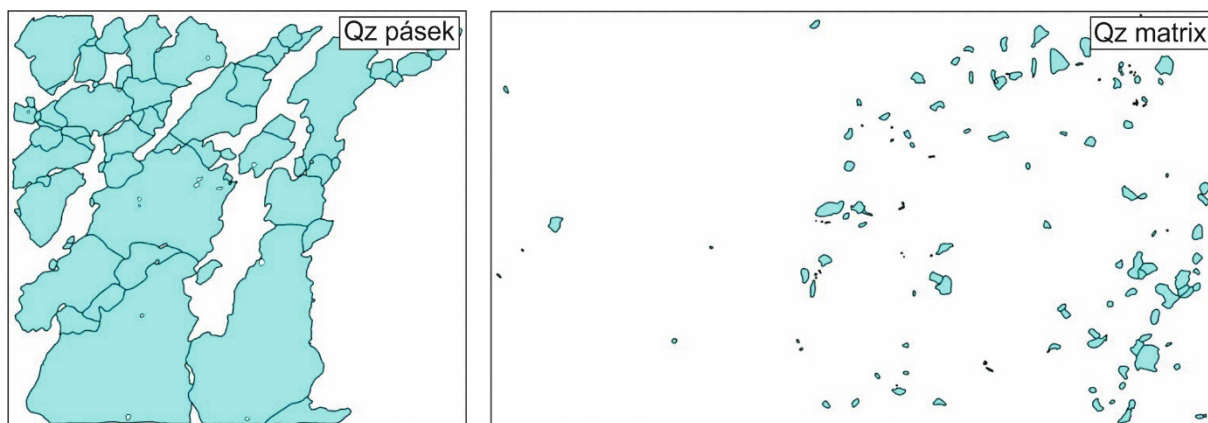
Vybrané území obsahuje 845 zrn jednotlivých minerálních fází, z čehož zhruba 74 procent představují živce a 24 procent křemen (Tab. 9). Pro další pozorování byl křemen rozdělen na zrna vyskytující se v matrix (Qz matrix) a křemenná zrna tvořící pásy (Qz pásek; Obr. 34).



Obr. 32. Některé prvkové mapy použité k digitalizaci mapy 1 kliváže I. Bílá a černá čára značí orientaci kliváže S2.



Obr. 33. Digitalizovaná mikrostruktura mapy 1 kliváže I. s křemennými pásy a dvouživcovou matrix.



Obr. 34. Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásék) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně mapy 1.

Tab. 9. Tabulka zobrazující počet jednotlivých digitalizovaných zrn a jejich procentuální podíl v digitalizované mapě 1 kliváže I.

Kliváž I. (mapa 1)	Počet digitalizovaných zrn	Procentuální podíl zrn
Qz pásék	67	7,93
Qz matrix	138	16,33
Plg	289	34,2
Kfs	333	39,41
Ap	17	2,01
Grt	1	0,12
Total	845	100

Nejsou započítány plagioklasové (albitové) lemy.

6.1.1 Distribuce velikosti zrn v doméně mapy 1

Pro jednotlivé fáze byla určena průměrná velikost jednotlivých minerálních fází a střední hodnota velikosti zrn, která je vyjádřena mediánem. Největší velikosti zrn jsou vyjádřeny pomocí max a naopak nejmenší velikosti jednotlivých zrn pomocí min za použití EAD (equal area diameter).

Digitalizovaná křemenná zrna v pásku se pohybují v rozmezí 11,861 do 311,457 μm a zrna v matrix v rozmezí od 1,333 do 49,042 μm . Zrna draselného živce se pohybují v rozmezí od 3,281 do 139,042 μm a plagioklasová zrna (bez plagioklasových lemů albitového složení, tzv. albitových lemů) jsou v rozmezí mezi 1,995 a 80,422 μm (Tab. 10).

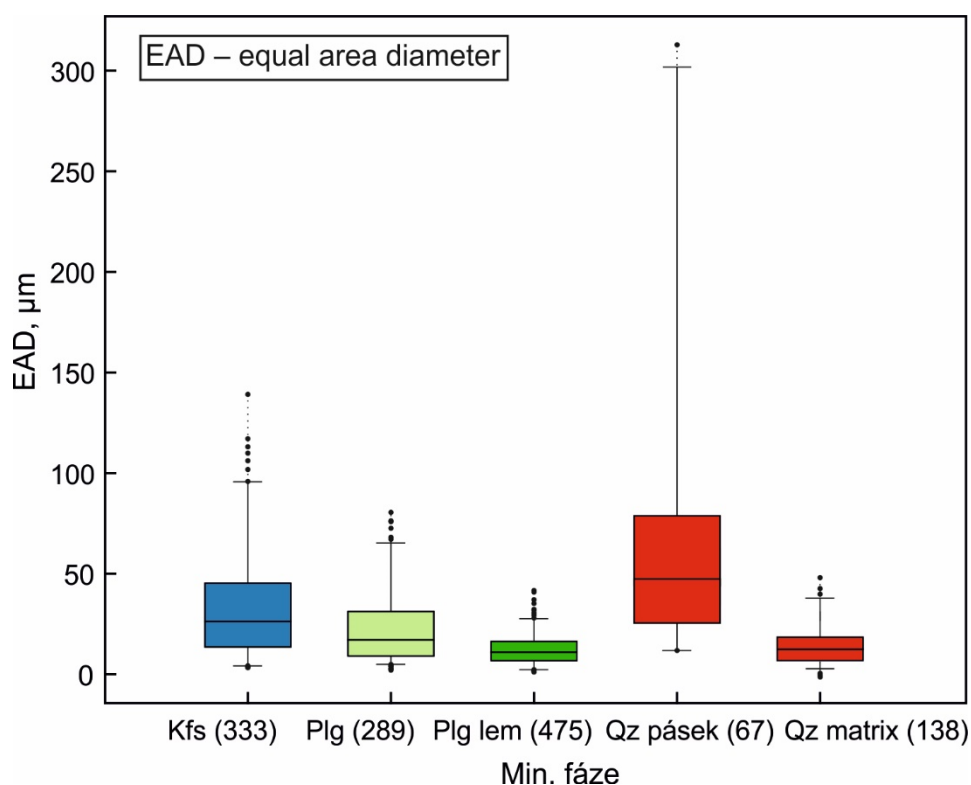
Průměrná velikost křemenných zrn v křemenném pásku se pohybuje okolo 65 μm a okolo 14 μm v matrix, u draselného živce okolo 32 μm a u plagioklasu bez jeho plagioklasových (albitových) lemů je průměrná velikost okolo 22 μm (Tab. 10).

Celý rozsah 2D distribuce velikosti zrn jednotlivých minerálních fází v μm byl také vyjádřen pro lepší porozumění seskupenými krabicovými diagramy, tzv. boxploty. Pomocí

těchto boxplotů lze rozlišit střední „krabicovou“ část diagramu, která je shora ohraničena 3. kvantilem, zespodu 1. kvantilem a mezi nimi se nachází horizontální linie vymežující medián. Linie vycházející ze střední části diagramu kolmo nahoru a dolů, tzv. vousy, vyjadřují variabilitu dat pod 1. a nad 3. kvantilem. Odlehlé hodnoty jsou v diagramu vykresleny jako jednotlivé body (Obr. 35).

Tab. 10. Tabulka zobrazující EAD měření v μm z hlediska minima, mediánu, maxima a průměrných velikostí jednotlivých minerálních fází v mapě 1 kliváže I.

Kliváž I. (mapa 1)	min	medián	max	průměr
Qz pásek	11,861	46,073	311,457	64,992
Qz matrix	1,333	12,512	49,042	13,558
Plg	1,995	17,043	80,422	21,939
Plg lem	1,107	10,864	41,573	12,101
Kfs	3,281	26,178	139,042	32,044
Ap	3,244	7,733	11,826	7,600
Grt	49,533	49,533	49,533	49,533



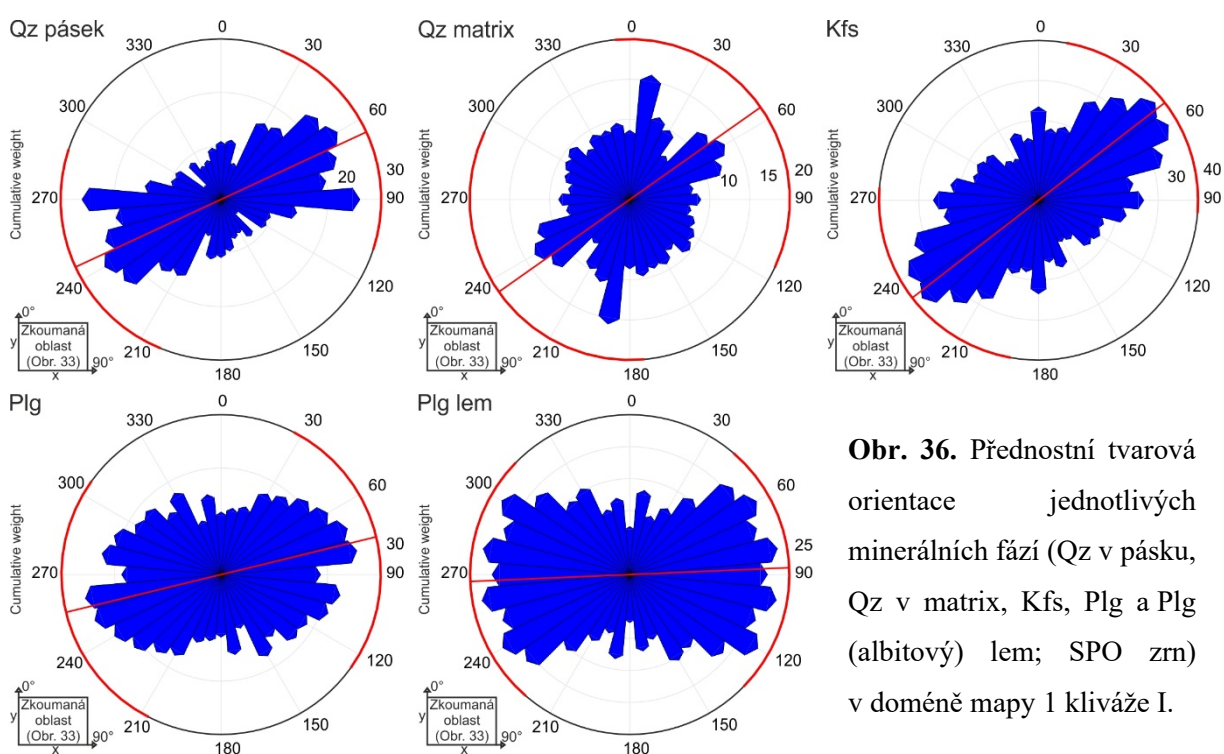
Obr. 35. Boxploty zobrazující distribuci velikostí zrn jednotlivých minerálních fází v μm pomocí EAD u mapy 1 kliváže I. Střední část diagramu je shora ohraničena 3. kvantilem, zespodu 1. kvantilem a mezi nimi se nachází linie vymežující medián. Linie vycházející ze střední části diagramu vyjadřují variabilitu dat pod 1. a nad 3. kvantilem. Odlehlé hodnoty jsou vykresleny jako jednotlivé body.

6.1.2 Tvarová přednostní orientace jednotlivých minerálních fází (SPO zrn) v doméně mapy 1

U kliváže I. v doméně mapy 1 mají zrna jednotlivých minerálů vyvinutou spíše slabší tvarovou přednostní orientaci (SPO zrn; Obr. 36).

Průměrná SPO zrn křemene v pásce svírá s osou y (viz Obr. 36) úhel zhruba 65° . Průměrná SPO zrn křemene v matrix je vůči ose y orientována v úhlu okolo 55° , avšak tento diagram nelze brát jako dostatečně reprezentující kvůli svému charakteru směrového rozložení četnosti zrn (Obr. 36).

Průměrná SPO zrn draselného živce svírá s osou y úhel zhruba 55° (Obr. 36). SPO zrn plagioklasu a jeho plagioklasových (albitových) lemů je orientována s větším sklonem než u ostatních minerálů a tento sklon průměrné SPO zrn plagioklasu a lemů svírá s osou y úhel zhruba $80\text{--}90^\circ$ (Obr. 36).



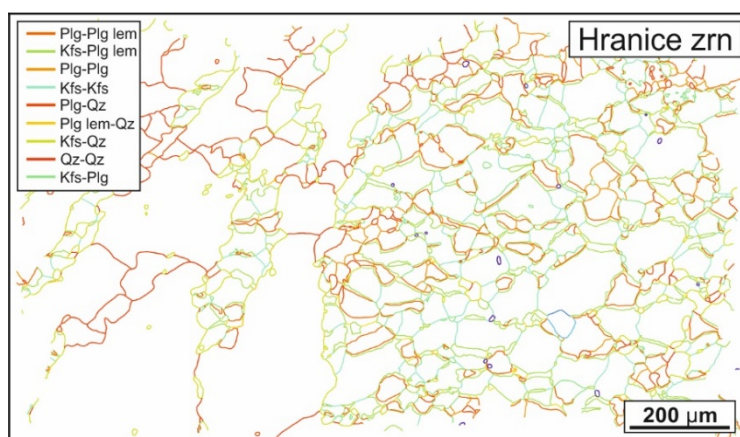
6.1.3 Tvarová přednostní orientace hranic zrn (SPO hranic zrn), síla SPO hranic zrn v doméně mapy 1

Pro bližší pozorování přednostní tvarové orientace byly vyobrazeny kontakty hranic zrn jednotlivých minerálních fází (Obr. 37) a pro tyto hranice byly vyneseny růžicové diagramy (Obr. 38). Dále byla vypočítána síla SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (Obr. 39).

Zkoumané hranice zrn:

- Kfs-Plg, Plg-Plg lem
- Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz
- Kfs-Kfs
- Kfs-Plg lem, Plg-Plg lem
- Plg-Plg
- Qz-Qz

V rámci této analýzy hraje důležitou roli výskyt albitových lemů okolo zrn plagioklasu, který dominuje výsledkům analýzy tvarové přednostní orientace. Z předchozích studií (viz výše Tajčmanová et al., 2012) je zřejmé, že tyto albitové lemy vznikaly v pozdní fázi petrogenetické historie po vývoji matrix a pravděpodobně souvisely s fluidní infiltrací a asociovanou albitizací při teplotách okolo 400 °C. Vzhledem k záměru této práce, co nejlépe charakterizovat primární fáze rozpadu ternárního živce, byla tedy uvažována i tzv. původní matrix s absencí těchto albitových lemů okolo zrn plagioklasu („Kfs-Plg, Plg-Plg lem“).



Obr. 37. Zkoumané hranice zrn jednotlivých minerálních fází domény mapy 1 kliváže I.

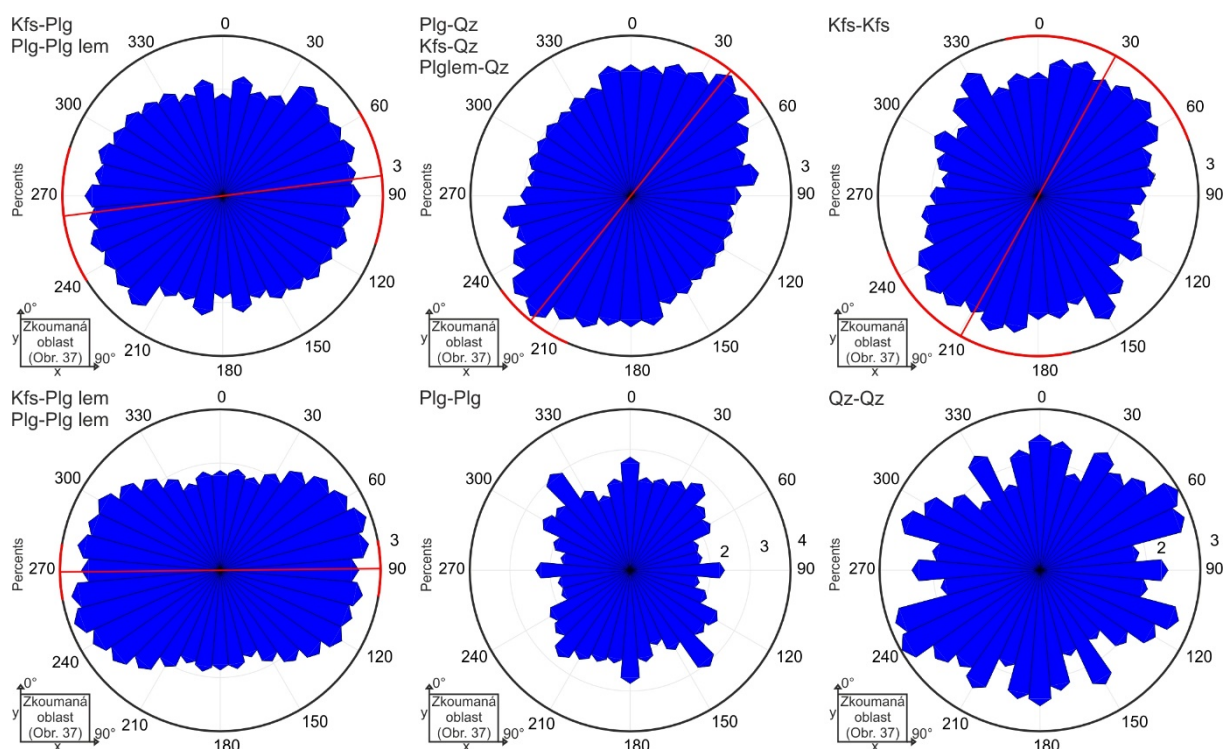
SPO hranic zrn v doméně mapy 1

Z růžicových diagramů (Obr. 38) můžeme pozorovat slabou přednostní orientaci hranic zrn. Průměrná SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (orientace tzv. původní matrix uvažující absenci albitových lemů okolo zrn plagioklasu) svírá s osou y (viz Obr. 38) úhel zhruba 85°.

Průměrná SPO hranic zrn „Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz“ a hranic zrn „Kfs-Kfs“ je téměř v orientaci kliváže, tzn. téměř paralelní s kliváží (Obr. 38). Průměrná orientace SPO hranic zrn „Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz“ je vůči ose y orientována v úhlu okolo 40° a orientace hranic zrn „Kfs-Kfs“ svírá s osou y úhel okolo 30° (Obr. 38).

U kontaktů hranic „Kfs-Plg lem, Plg-Plg lem“ můžeme pozorovat přednostní orientaci kvůli růstu albitových lemů a průměrná SPO těchto hranic zrn je vůči ose y orientována v úhlu 90° (Obr. 38).

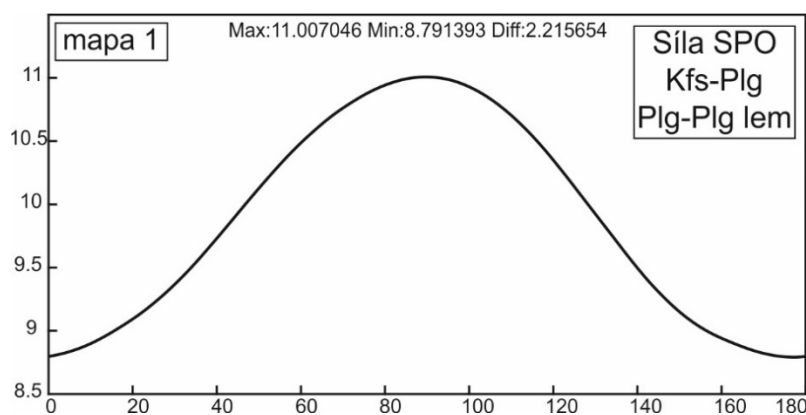
Průměrná SPO hranic zrn „Plg-Plg“ a „Qz-Qz“ není pozorována (Obr. 38).



Obr. 38. Růžicové diagramy zobrazující přednostní tvarovou orientaci jednotlivých hranic zrn v doméně mapy 1 kliváže I.

Síla SPO hranic zrn a orientace maxima v doméně mapy 1

Pro hranice zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (původní matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) v této doméně byla vypočítána také síla stavby, jež odpovídá intenzitě SPO (Obr. 39). Síla stavby byla vypočítána poměrem max a min z hranic zrn pomocí metody SURFOR (Panozzo, 1987). V tomto případě v doméně mapy 1 udávají hranice tzv. původní matrix bez albitových lemů okolo zrn plagioklasu („Kfs-Plg, Plg-Plg lem“) sílu SPO 1,2520. Úhel získané orientace maxima je zhruba 90° (Obr. 39).

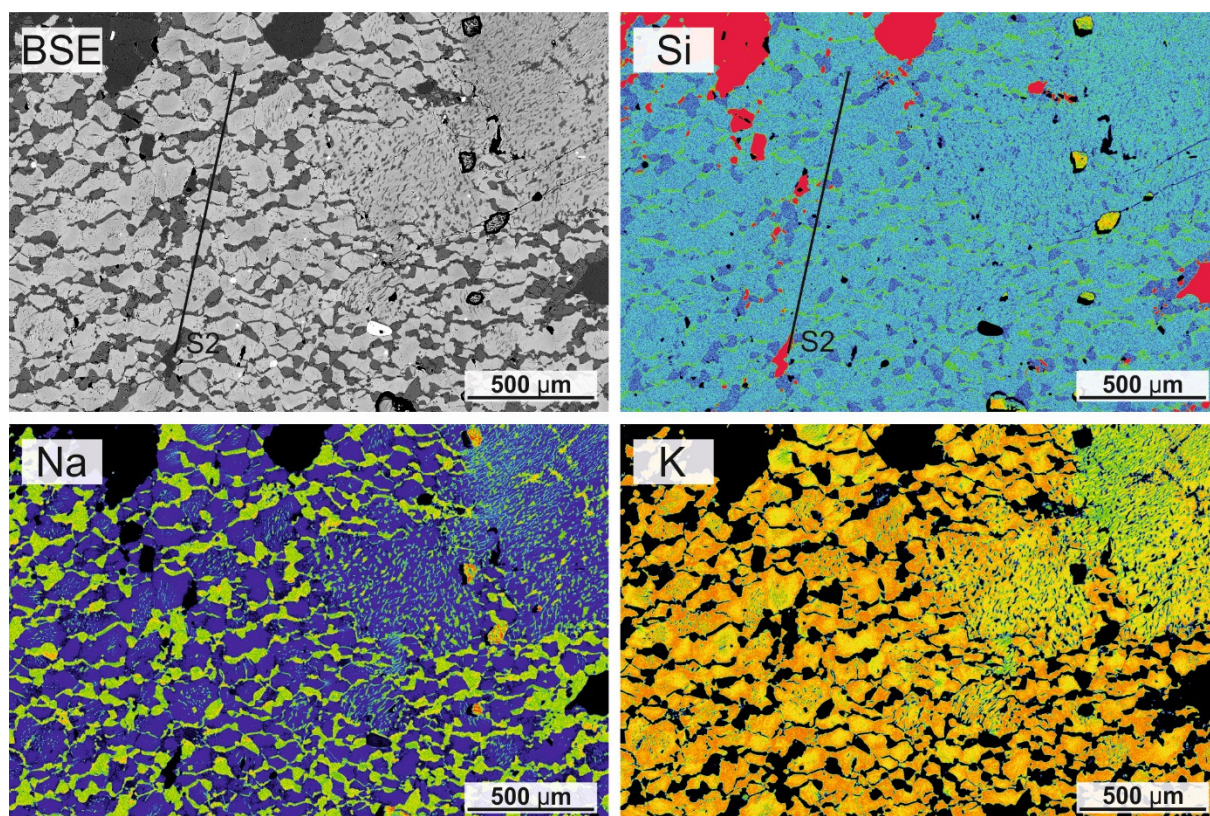


Obr. 39. Graf zobrazující sílu SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) v doméně mapy 1 kliváže I. Osa x – úhel, osa y – hodnoty vyprojektovaných hranic zrn. Síla SPO = max/min.

6.2 Kliváž I. – mapa 3

Ukázky některých použitých prvkových map, které byly použity pro vytvoření mapy 3, jsou pro porovnání s digitalizovanou mapou vyobrazeny v Obrázku 40. Území digitalizované mapy 3 (Obr. 41) bylo zkoumáno již v dřívějších kapitolách a bylo vybráno kvůli mikrostrukturní charakteristice dvouživcové matrix v okolí porfyroklastu pertitu.

Vybrané území k analyzování obsahuje 1606 zrn jednotlivých minerálních fází, z čehož zhruba 82 procent představují živce a 13 procent křemen (Tab. 11). Na tomto území se křemen vyskytuje pouze ve formě rozptýlených zrn v matrix (Qz matrix; Obr. 42).

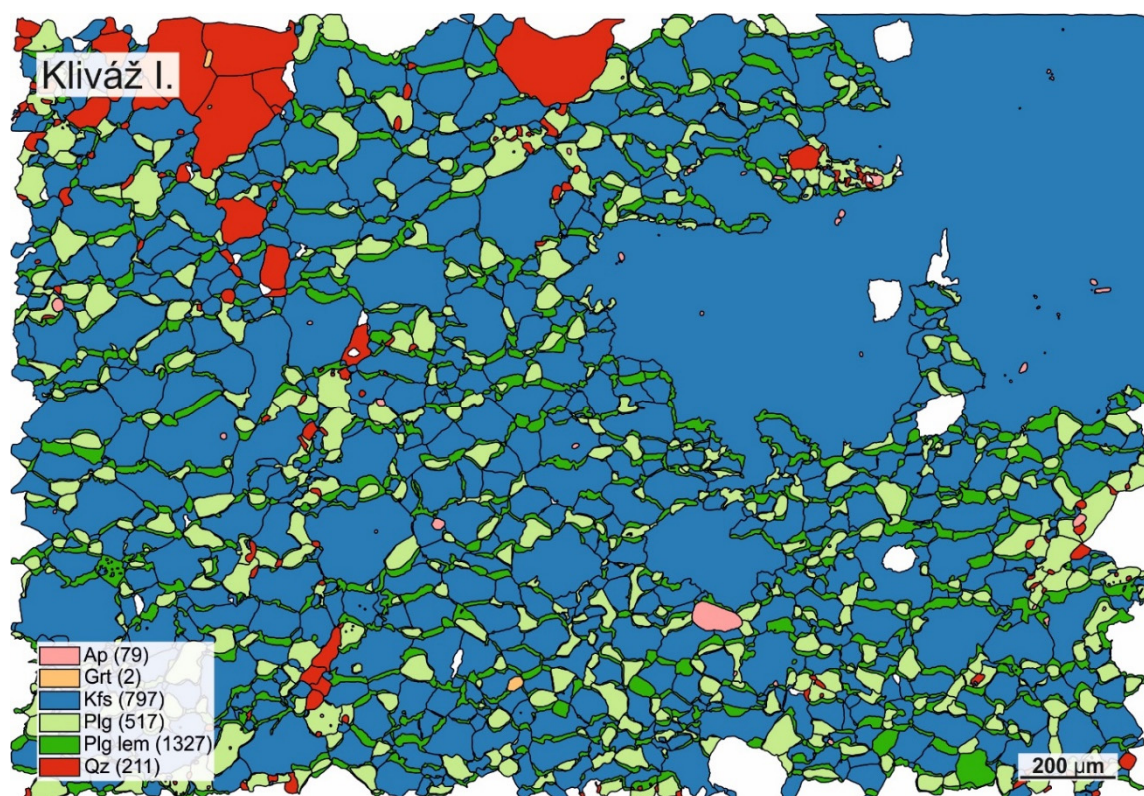


Obr. 40. Některé prvkové mapy použité k digitalizaci mapy 3 kliváže I. Černá čára značí orientaci kliváže S2.

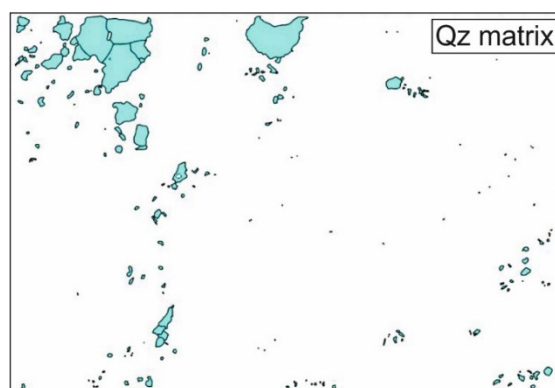
6.2.1 Distribuce velikosti zrn v doméně mapy 3

I u této mapy byla pro jednotlivé fáze posuzována distribuce velikosti zrn. Střední hodnota velikosti zrn je vyjádřena pomocí mediánu, největší velikosti zrn pomocí max a naopak nejmenší velikosti pomocí min za použití EAD (equal area diameter). S použitím EAD byla určena také průměrná velikost jednotlivých minerálních fází.

Digitalizovaná křemenná zrna v matrix se pohybují v rozmezí od 1,527 do 193,421 µm, zrna draselného živce se pohybují v rozmezí od 1,743 do 958,234 µm a plagioklasová zrna (bez



Obr. 41. Digitalizovaná mikrostruktura mapy 3 kliváže I. s porfyroklastem pertitu a dvouživcovou matrix. Bílá místa představují díry ve výbrusu.



Obr. 42. Distribuce křemenných zrn (Qz matrix) v doméně mapy 3.

Tab. 11. Tabulka zobrazující počet jednotlivých digitalizovaných zrn a jejich procentuální podíl v digitalizované mapě 3 kliváže I.

Kliváž I. (mapa 3)	Počet digitalizovaných zrn	Procentuální podíl zrn
Qz matrix	211	13,14
Plg	517	32,19
Kfs	797	49,63
Ap	79	4,92
Grt	2	0,12
Total	1606	100

Nejsou započítány plagioklasové (albitové) lemy.

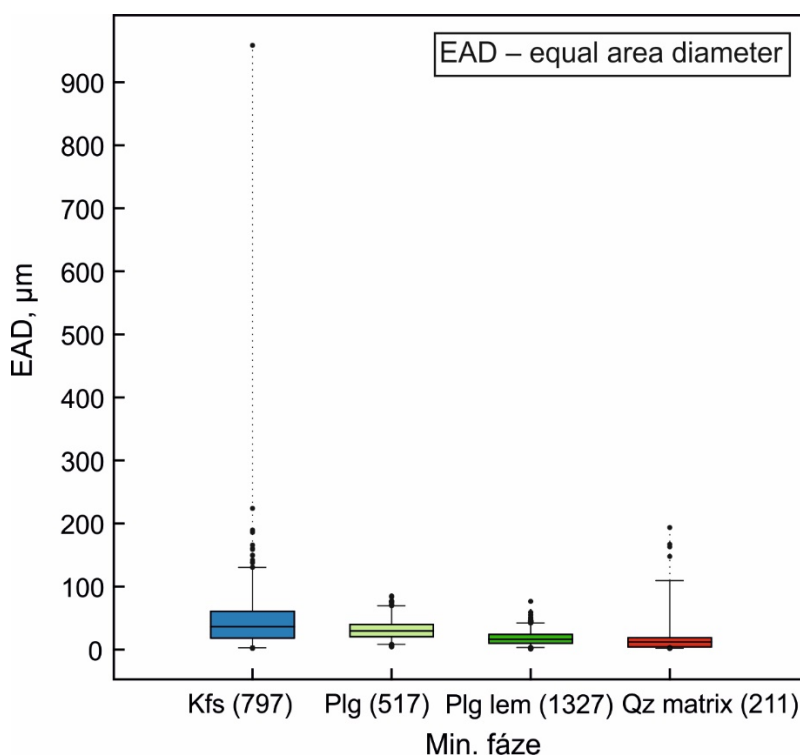
plagioklasových lemů albitového složení, tzv. albitových lemů) jsou v rozmezí od 3,962 do 84,942 μm (Tab. 12).

Průměrná velikost křemenných zrn v matrix se pohybuje okolo 18 μm , u draselného živce okolo 44 μm a u zrn plagioklasu nepočítaje albitové lemy se průměrná velikost zrn pohybuje okolo 31 μm (Tab. 12).

Také u tohoto území byl pomocí seskupených krabicových diagramů (boxplotů) vyjádřen pro lepší vizualizaci celý rozsah 2D distribuce velikosti zrn jednotlivých minerálních fází v μm . Nejvýraznější odlehlé hodnoty, které jsou vykreslené v diagramu jako jednotlivé body, lze pozorovat u draselného živce, a to díky přítomnosti porfyroklastu pertitu (Obr. 43).

Tab. 12. Tabulka zobrazující EAD měření v μm z hlediska minima, mediánu, maxima a průměrných velikostí jednotlivých minerálních fází v mapě 3 kliváže I.

Kliváž I. (mapa 3)	min	medián	max	průměr
Qz matrix	1,527	11,693	193,421	17,655
Plg	3,962	29,209	84,942	31,108
Plg lem	0,607	16,161	76,279	17,556
Kfs	1,743	36,023	958,234	43,903
Ap	1,897	4,649	76,594	8,014
Grt	23,660	27,312	30,963	27,312



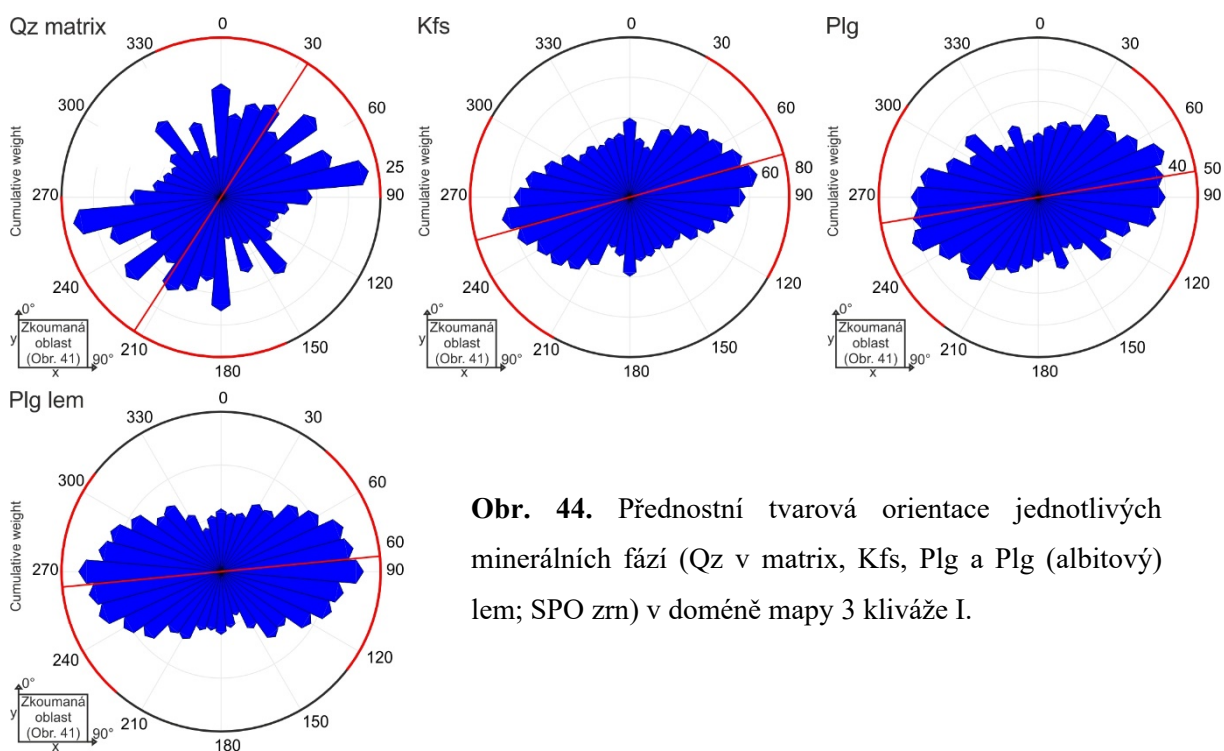
Obr. 43. Boxploty zobrazující distribuci velikostí zrn jednotlivých minerálních fází v μm pomocí EAD u mapy 3 kliváže I. Střední část diagramu je shora ohraničena 3. kvantilem, zesponu 1. kvantilem a mezi nimi se nachází linie vymezující medián. Linie vycházející ze střední části diagramu vyjadřují variabilitu dat pod 1. a nad 3. kvantilem. Odlehlé hodnoty jsou vykresleny jako jednotlivé body.

6.2.2 Tvarová přednostní orientace jednotlivých minerálních fází (SPO zrn) v doméně mapy 3

U kliváže I. v doméně mapy 3 mají zrna jednotlivých minerálů vyvinutou slabší tvarovou přednostní orientaci (SPO zrn; Obr. 44).

SPO zrn křemene je v této doméně velice slabě vyvinutá, jedná se totiž pouze o malé množství jednotlivých zrn roztroušených v matrix. Průměrná SPO těchto křemenných zrn je vůči ose y (viz Obr. 44) orientována v úhlu zhruba 30° , avšak tento diagram nelze brát jako dostatečně reprezentující kvůli svému charakteru směrového rozložení četnosti zrn (Obr. 44).

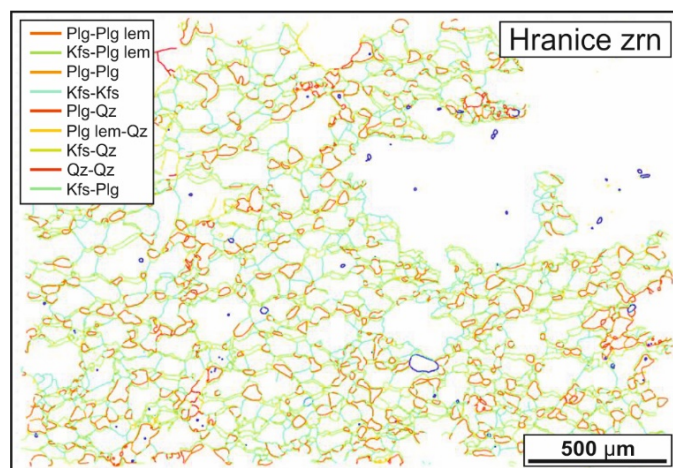
Průměrná SPO zrn draselného živce svírá s osou y úhel zhruba 75° a u zrn plagioklasu a jeho plagioklasových (albitových) lemů má téměř shodnou orientaci (Obr. 44). SPO zrn plagioklasu je orientována vůči ose y v úhlu zhruba 80° a u lemů v úhlu 85° vůči ose y (Obr. 44).



Obr. 44. Přednostní tvarová orientace jednotlivých minerálních fází (Qz v matrix, Kfs, Plg a Plg (albitový) lem; SPO zrn) v doméně mapy 3 kliváže I.

6.2.3 Tvarová přednostní orientace hranic zrn (SPO hranic zrn), síla SPO hranic zrn v doméně mapy 3

Pro bližší pozorování přednostní tvarové orientace v doméně mapy 3 kliváže I. byly vyobrazeny kontakty hranic zrn jednotlivých minerálních fází (Obr. 45), a to stejným způsobem jako u předchozí mapy. I pro tyto hranice byly vyneseny růžicové diagramy (Obr. 46) a síla SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (Obr. 47).



Obr. 45. Zkoumané hranice zrn jednotlivých minerálních fází domény mapy 3 kliváže I.

SPO hranic zrn v doméně mapy 3

Z růžicových diagramů (Obr. 46) můžeme pozorovat slabou přednostní orientaci hranic zrn. Průměrná přednostní tvarová orientace hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (orientace tzv. původní matrix uvažující absenci albitových lemů okolo zrn plagioklasu) svírá s osou y úhel 60° (viz Obr. 46).

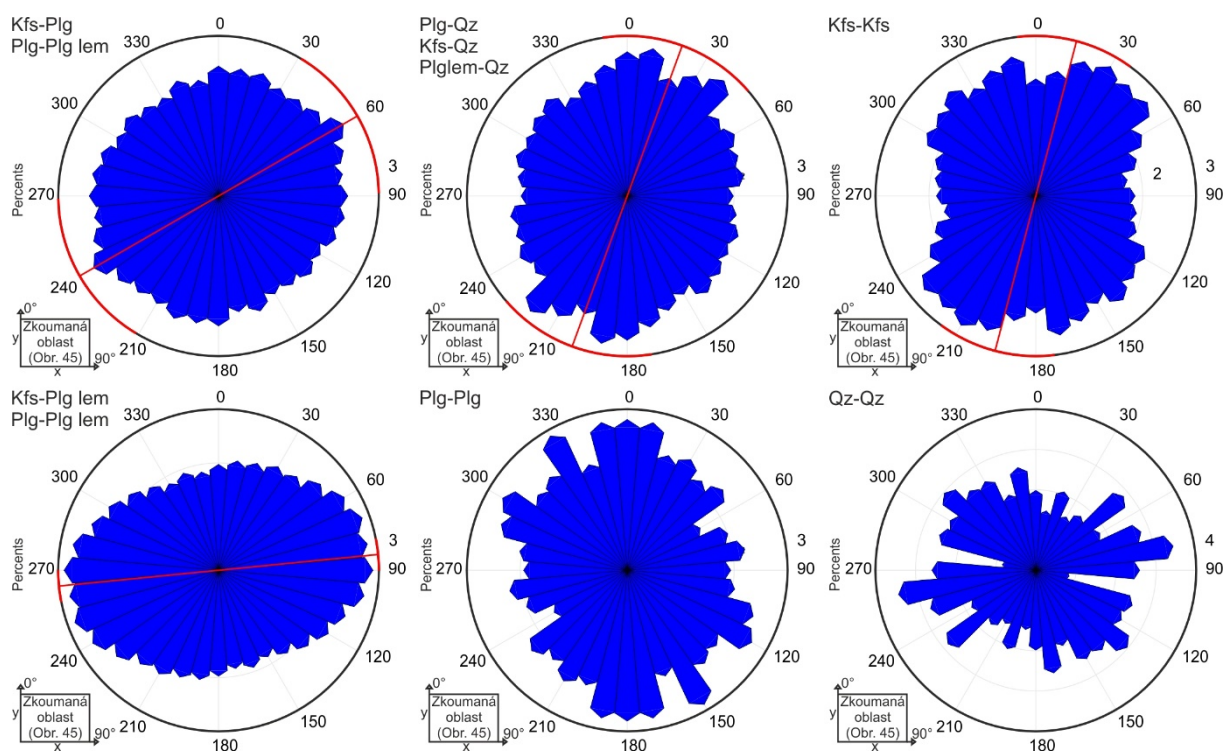
Průměrná SPO hranic zrn „Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz“ a hranic zrn „Kfs-Kfs“ je v orientaci kliváže, tzn. paralelní s kliváží (Obr. 46). Průměrná SPO hranic „Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz“ je vůči ose y orientována v úhlu okolo 20° a orientace hranic „Kfs-Kfs“ svírá s osou y úhel okolo 15° (Obr. 46).

U kontaktů hranic „Kfs-Plg lem, Plg-Plg lem“ můžeme pozorovat přednostní orientaci kvůli růstu albitových lemů a průměrná SPO těchto hranic svírá s osou y úhel téměř 90° (Obr. 46).

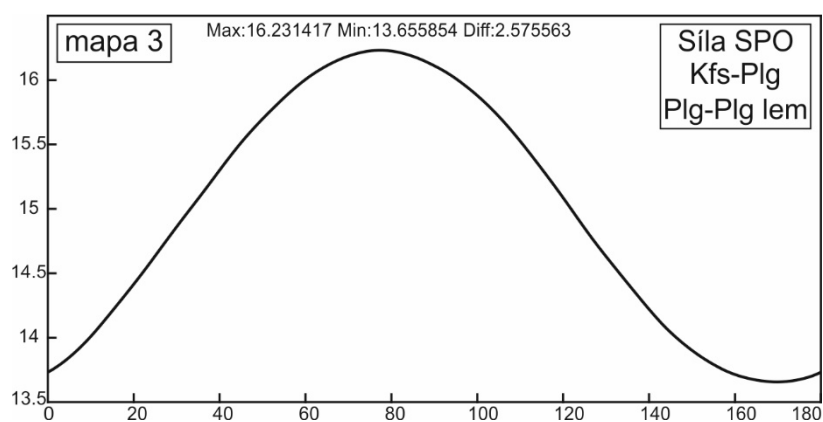
Průměrná SPO hranic zrn „Plg-Plg“ a „Qz-Qz“ není pozorována (Obr. 46).

Síla SPO hranic zrn a orientace maxima v doméně mapy 3

Pro hranice zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (původní matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) v této doméně byla vypočítána síla stavby, jež odpovídá intenzitě SPO (Obr. 47). Síla stavby byla vypočítána poměrem max a min z hranic zrn pomocí metody SURFOR (Panozzo, 1987). V tomto případě v doméně mapy 3 udávají hranice tzv. původní matrix bez albitových lemů okolo zrn plagioklasu („Kfs-Plg, Plg-Plg lem“) sílu SPO 1,1886. Získaná orientace maxima taktéž pomocí metody SURFOR je zhruba 75° (Obr. 47).



Obr. 46. Růžicové diagramy zobrazující přednostní tvarovou orientaci jednotlivých hranic zrn v doméně mapy 3 kliváže I.

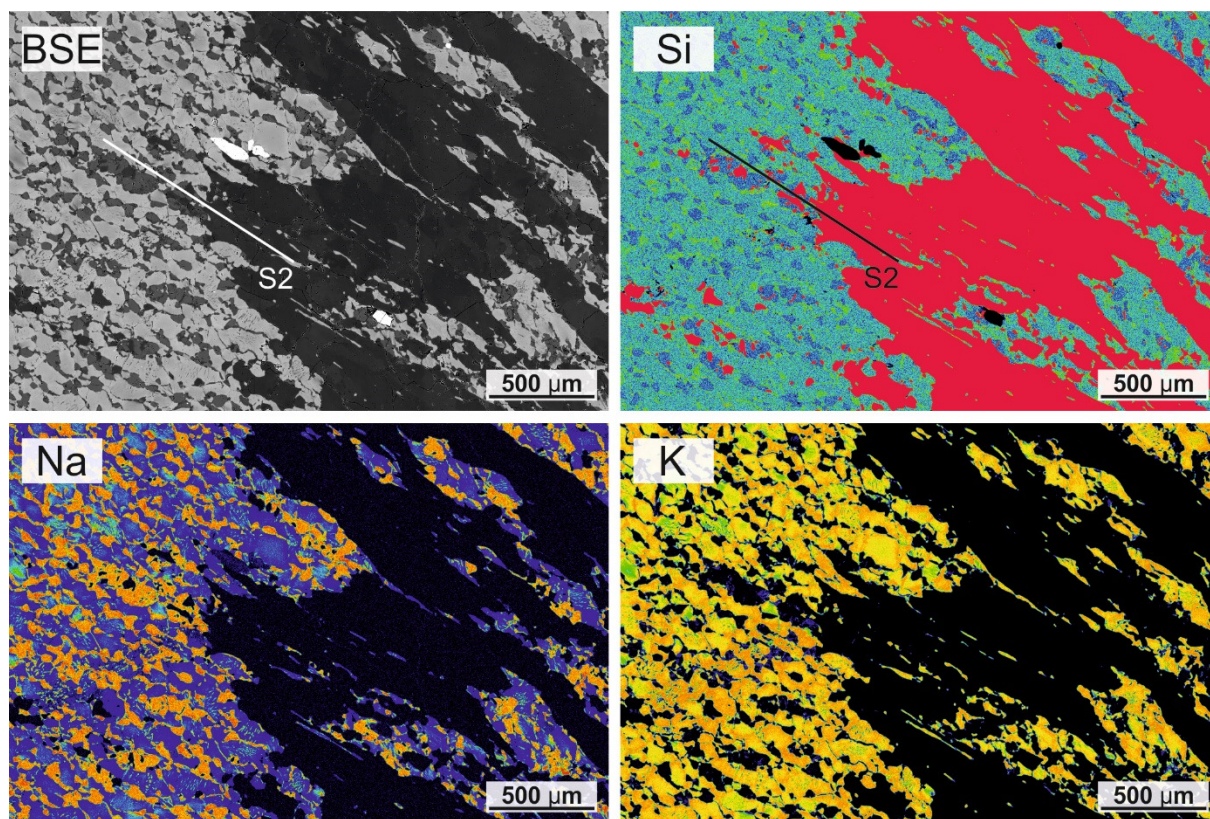


Obr. 47. Graf zobrazující sílu SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) v doméně mapy 3 kliváže I. Osa x – úhel, osa y – hodnoty vyprojektovaných hranic zrn. Síla SPO = max/min.

6.3 Kliváž II. – mapa 2

Některé použité prvkové mapy pro vytvoření mapy 2 jsou pro porovnání s digitalizovanou mapou vyobrazeny v Obrázku 48. Území digitalizované mapy 2 (Obr. 49) bylo vybráno kvůli mikrostrukturním vztahům mezi hrubozrnným křemenným pásem a vznikající kliváží a kvůli dvouživcové matrix.

Vybrané území obsahuje dohromady 3015 zrn jednotlivých minerálních fází, z čehož přibližně 68 procent představují živce a 31 procent zrna křemene (Tab. 13). Pro další pozorování byl křemen rozdělen na zrna vyskytující se v matrix (Qz matrix) a křemenná zrna tvořící pásy (Qz pásek; Obr. 50).



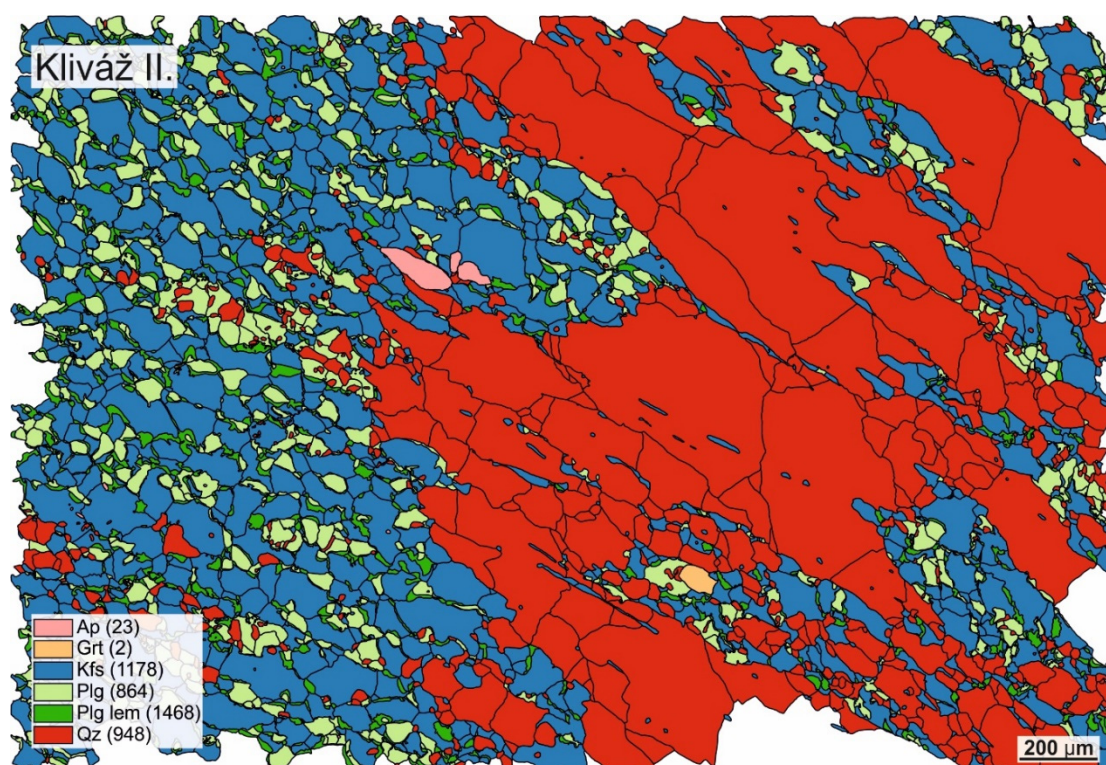
Obr. 48. Některé prvkové mapy použité k digitalizaci mapy 2 kliváže II. Bílá a černá čára značí orientaci kliváže S2.

6.3.1 Distribuce velikosti zrn v doméně mapy 2

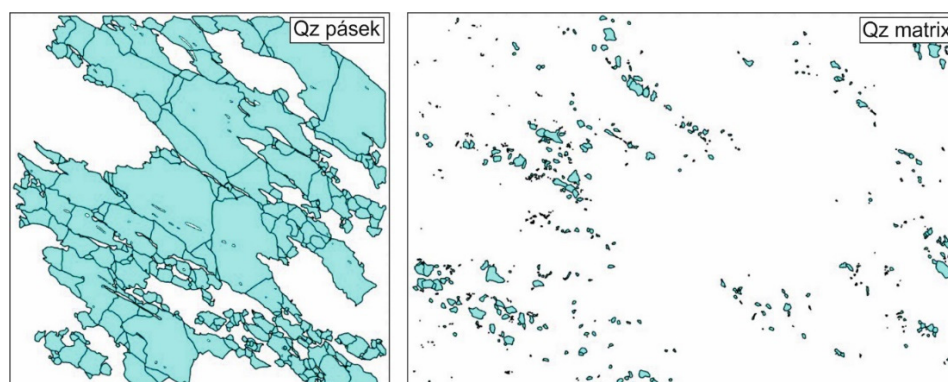
Pro jednotlivé fáze byla opět posuzována distribuce velikosti zrn, kdy střední hodnota velikosti zrn je vyjádřena pomocí mediánu, největší velikosti zrn pomocí max a naopak nejmenší velikosti jednotlivých zrn pomocí min. Určována byla také průměrná velikost jednotlivých minerálních fází. Vše bylo provedeno s použitím EAD (equal area diameter).

Digitalizovaná křemenná zrna v pásku se pohybují v rozmezí od 5,971 do 451,423 μm a v matrix v rozmezí od 0,991 do 77,552 μm . Zrna draselného živce se pohybují v rozmezí od 1,452 do 169,347 μm a plagioklasová zrna (bez plagioklasových lemů albitového složení, tzv. albitových lemů) se pohybují mezi 1,930 a 97,266 μm (Tab. 14).

Průměrná velikost křemenných zrn je okolo 66 μm v křemenném pásku a okolo 12 μm



Obr. 49. Digitalizovaná mikrostruktura mapy 2 kliváže II. s křemennými pásy a dvouživcovou matrix.



Obr. 50. Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně mapy 2.

Tab. 13. Tabulka zobrazující počet jednotlivých digitalizovaných zrn a jejich procentuální podíl v digitalizované mapě 2 kliváže II.

Kliváž II. (mapa 2)	Počet digitalizovaných zrn	Procentuální podíl zrn
Qz pásek	317	10,51
Qz matrix	631	20,93
Plg	864	28,66
Kfs	1178	39,07
Ap	23	0,76
Grt	2	0,07
Total	3015	100

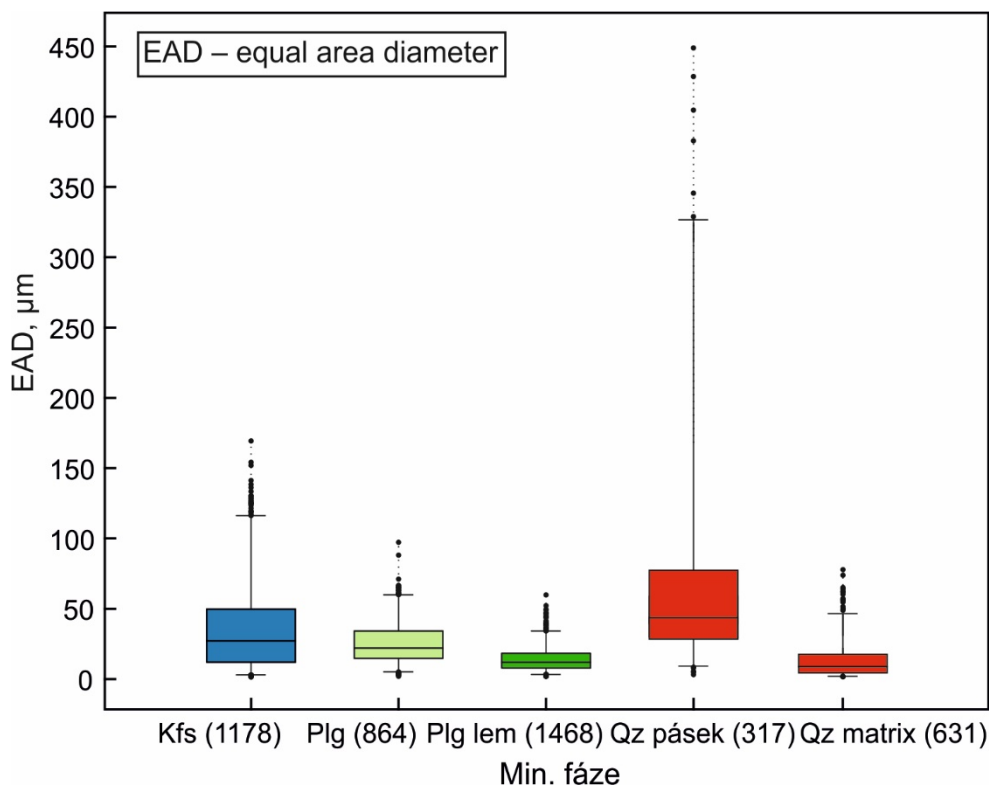
Nejsou započítány plagioklasové (albitové) lemy.

v matrix, u draselného živce okolo 35 μm a zrna plagioklasu bez jeho albitových lemů se pohybují o průměrné velikosti 25 μm (Tab. 14).

Celý rozsah 2D distribuce velikosti zrn jednotlivých minerálních fází v μm , který je vyjádřen seskupenými krabicovými diagramy (boxploty), lze pozorovat na Obrázku 51.

Tab. 14. Tabulka zobrazující EAD měření v μm z hlediska minima, mediánu, maxima a průměrných velikostí jednotlivých minerálních fází v mapě 2 kliváže II.

Kliváž II. (mapa 2)	min	medián	max	průměr
Qz pásek	5,971	42,915	451,423	65,692
Qz matrix	0,991	8,450	77,552	12,347
Plg	1,930	21,977	97,266	25,458
Plg lem	1,872	11,866	59,822	13,814
Kfs	1,452	27,131	169,347	34,938
Ap	3,092	7,446	110,428	16,708
Grt	14,048	45,904	77,760	45,904



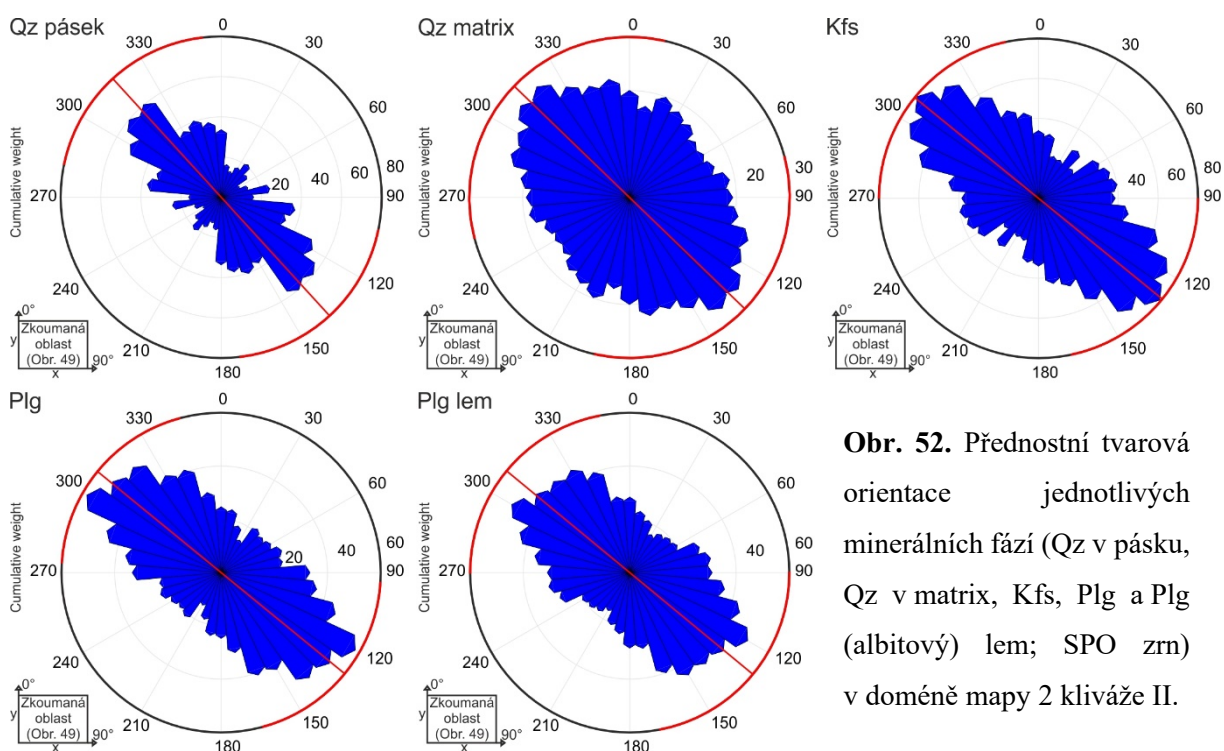
Obr. 51. Boxploty zobrazující distribuci velikostí zrn jednotlivých minerálních fází v μm pomocí EAD u mapy 2 kliváže II. Střední část diagramu je shora ohraničena 3. kvartilem, zesponu 1. kvartilem a mezi nimi se nachází linie vymežující medián. Linie vycházející ze střední části diagramu vyjadřují variabilitu dat pod 1. a nad 3. kvartilem. Odlehlé hodnoty jsou vykresleny jako jednotlivé body.

6.3.2 Tvarová přednostní orientace jednotlivých minerálních fází (SPO zrn) v doméně mapy 2

U kliváže II. v doméně mapy 2 mají zrna křemene v pásce, zrna křemene v matrix, zrna draselného živce a plagioklasu společně s jeho plagioklasovými lemy albitového složení silně vyvinutou tvarovou přednostní orientaci (SPO zrn; Obr. 52).

Průměrná SPO zrn křemene v pásce je v této doméně orientována v úhlu zhruba 140° vůči ose y (viz Obr. 52) a průměrná SPO zrn křemene v matrix je podobná, a to vůči ose y v úhlu okolo 135° (Obr. 52).

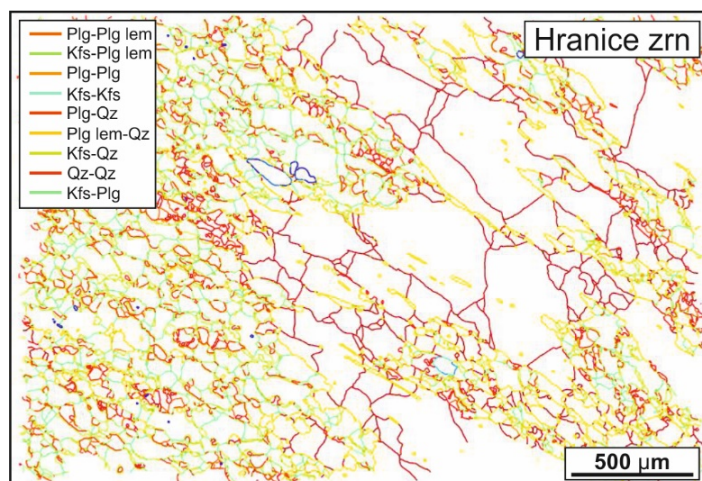
Průměrná SPO zrn draselného živce, plagioklasu a jeho plagioklasových lemů má shodnou orientaci, a to zhruba úhel 130° vůči ose y (Obr. 52).



Obr. 52. Přednostní tvarová orientace jednotlivých minerálních fází (Qz v pásce, Qz v matrix, Kfs, Plg a Plg (albitový) lem; SPO zrn) v doméně mapy 2 kliváže II.

6.3.3 Tvarová přednostní orientace hranic zrn (SPO hranic zrn), síla SPO hranic zrn v doméně mapy 2

Pro bližší pozorování přednostní tvarové orientace v doméně mapy 2 byly vyobrazeny kontakty hranic zrn jednotlivých minerálních fází (Obr. 53), a to stejným způsobem jako u předchozích map. Jako u předchozího vzorku byly pro tyto hranice vyneseny růžicové diagramy (Obr. 54) a síla SPO hranic zrn tzv. původní matrix bez albitových lemů okolo zrn plagioklasu („Kfs-Plg, Plg-Plg lem“; Obr. 55).



Obr. 53. Zkoumané hranice zrn jednotlivých minerálních fází domény mapy 2 kliváže II.

SPO hranic zrn v doméně mapy 2

Pomocí růžicových diagramů (Obr. 54) můžeme pozorovat, že průměrná přednostní tvarová orientace hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (orientace tzv. původní matrix uvažující absenci albitových lemů okolo zrn plagioklasu) je v orientaci kliváže, tzn. paralelní s kliváží a svírá s osou y (viz Obr. 54) úhel zhruba 130° .

Průměrná SPO hranic zrn „Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz“ je také v orientaci kliváže a tyto hranice jsou vůči ose y orientovány v úhlu okolo 125° (Obr. 54).

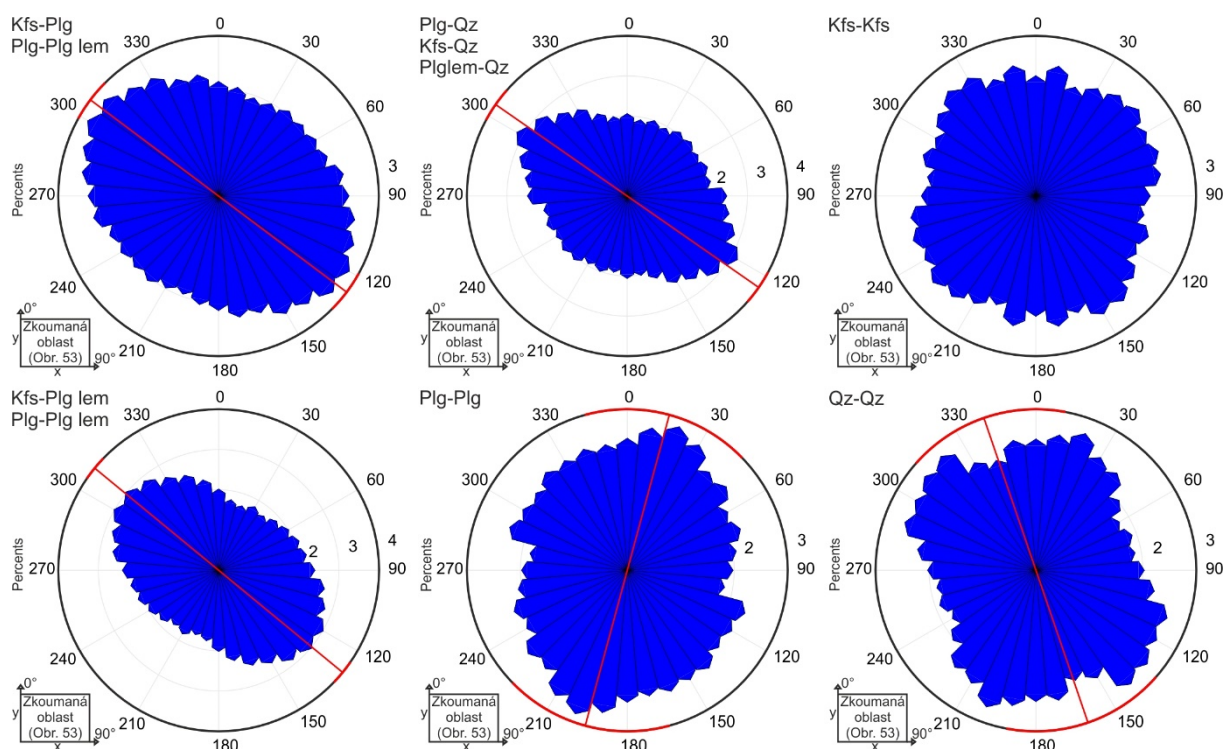
Průměrná SPO hranic zrn „Kfs-Kfs“ není pozorována (Obr. 54).

Průměrná SPO hranic zrn „Kfs-Plg lem, Plg-Plg lem“ svírá s osou y úhel zhruba 130° (Obr. 54).

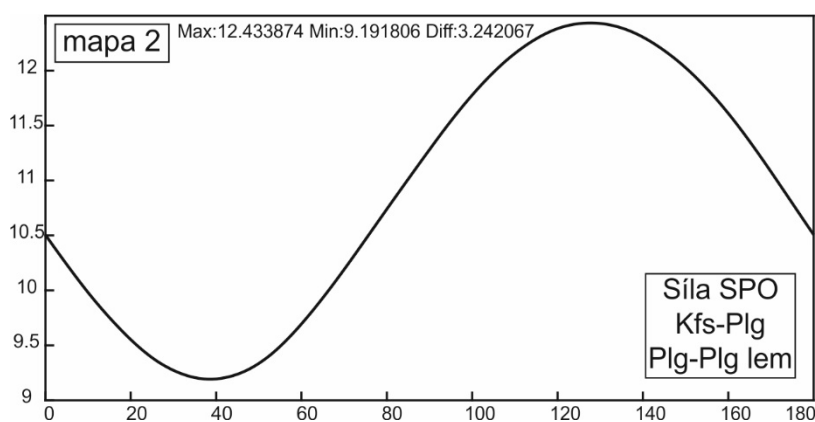
Hranice zrn „Plg-Plg“ mají průměrnou SPO vůči ose y orientovanou v úhlu okolo 195° a hranice zrn „Qz-Qz“ v úhlu okolo 160° vůči ose y (Obr. 54).

Síla SPO hranic zrn a orientace maxima v doméně mapy 2

Pro hranice zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (původní matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) byla vypočítána síla stavby, jež odpovídá intenzitě SPO (Obr. 55). Síla stavby byla vypočítána poměrem max a min z hranic zrn pomocí metody SURFOR (Panozzo, 1987). V tomto případě v doméně mapy 2 udávají hranice tzv. původní matrix bez albitových lemů okolo zrn plagioklasu („Kfs-Plg, Plg-Plg lem“) sílu SPO 1,3527. Orientace maxima je zhruba 130° (Obr. 55).



Obr. 54. Růžicové diagramy zobrazující přednostní tvarovou orientaci jednotlivých hranic zrn v doméně mapy 2 kliváže II.



Obr. 55. Graf zobrazující sílu SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ (matrix s absencí albitových lemů okolo zrn plagioklasu) v doméně mapy 2 kliváže II. Osa x – úhel, osa y – hodnoty vyprojektovaných hranic zrn. Síla SPO = max/min.

7. Difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD)

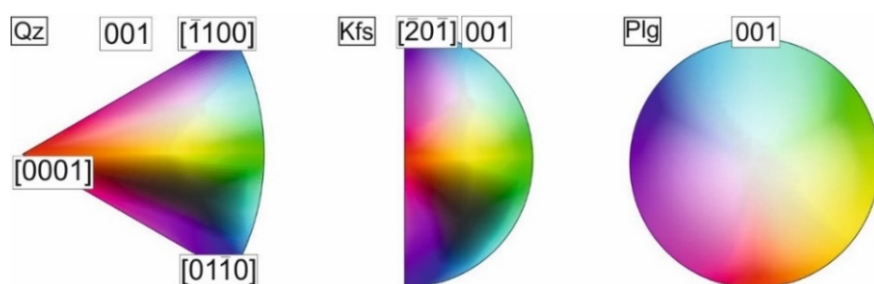
Kvantitativní texturní analýza metodou difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD) byla provedena ze šesti území, tři území byla vybrána ze vzorku kliváže I. a tři území ze vzorku kliváže II.

Data byla získána za účelem určení přednostní krystalografické orientace (CPO – crystallographic preferred orientation) jednotlivých minerálů a byla zpracována pomocí toolboxu MTEX v prostředí Matlab (Bachmann a Hielscher, 2005–2016).

Vyneseny byly mapy se všemi minerálními fázemi a následně mapy s krystalografickými orientacemi křemene, draselného živce a plagioklasu. Mapy krystalografických orientací zrn byly barveny na základě barevného schéma inverzních pólových diagramů (ipdf – inverse pole figure diagram) zkonstruovaných vůči ose z (viz Obr. 56). Inverzní pólové diagramy jsou pro rychlejší orientaci taktéž zobrazeny u map orientací zrn.

Pólové diagramy byly vyneseny z jednotlivých zrn, tzn. vynášena je zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli, a to pro křemen, draselný živec (složením ortoklas) a plagioklas (složením oligoklas). Stejně jako v mikrostrukturní analýze byla pro vynášení do pólových diagramů křemenná zrna rozdělena na zrna vyskytující se v křemenném pásku (Qz pásek) a na zrna v matrix (Qz matrix). Přednostní krystalografická orientace (CPO) u křemene je v Obrázcích 59, 62, 65, 68, 71, 74 a 77 vyjádřena podle krystalografických ploch (10-10), (11,-2,0) a (0001). U draselného živce a plagioklasu jsou výsledky vyneseny podle krystalografických ploch (100), (010) a (001).

Skripty použité k analyzování jsou uvedeny na konci práce v Příloze.



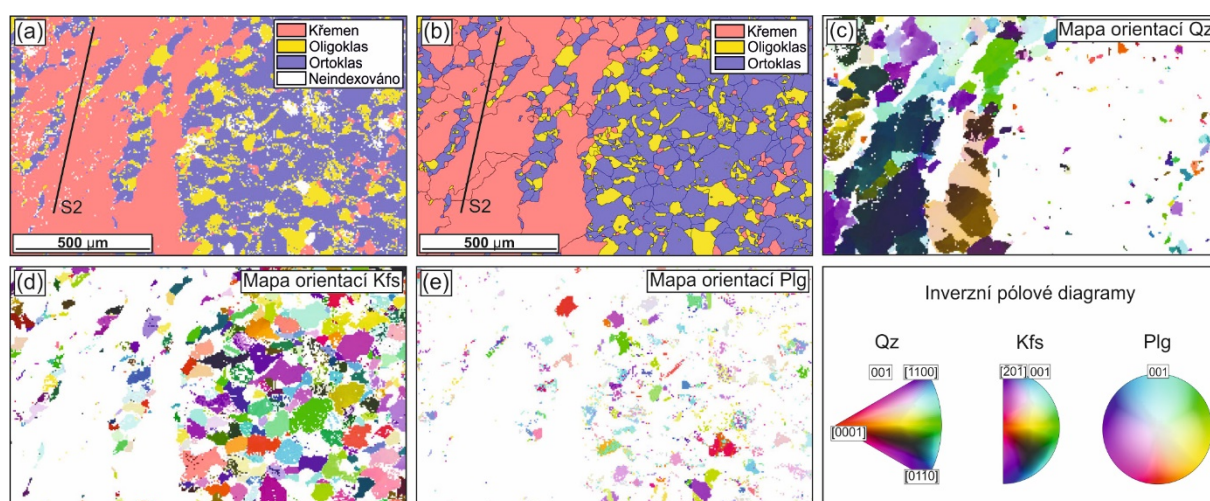
Obr. 56. Inverzní pólové diagramy zkonstruované vůči ose z pro křemen, draselný živec a plagioklas (ipdf – inverse pole figure diagram) použité pro barvení map krystalografických orientací.

7.1 Kliváž I. – území domény 2_1

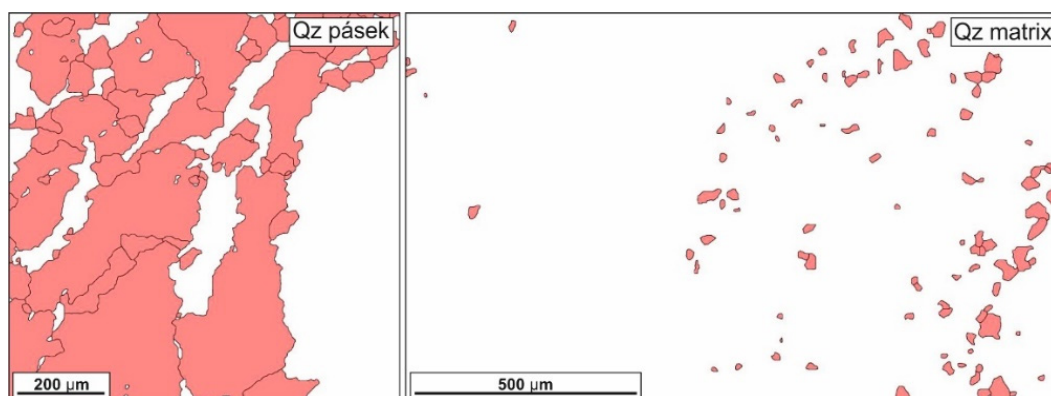
Území domény 2_1 je známé již z dřívějšího analyzování kvantitativní mikrostrukturní analýzou (viz výše). Původní data domény 2_1 si lze prohlédnout na Obrázku 57a. Po odstranění neindexovaných polí, po rekonstrukci zrn bez těchto polí a po dalších korekcích bylo možné zobrazit mapu všech minerálních fází v konečné podobě (Obr. 57b). Mapy krystalografických orientací zrn křemene, draselného živce (složením ortoklas) a plagioklasu (složením oligoklas) si lze prohlédnout na Obrázku 57c, d, e.

Pólové diagramy pro zrna křemene separovaná na zrna v pásku a v matrix (Obr. 58), pro zrna draselného živce a plagioklasu lze nalézt v Obrázku 59. Plná čára v diagramech značí orientaci kliváže S2 viditelnou z map viz Obrázek 57a, b.

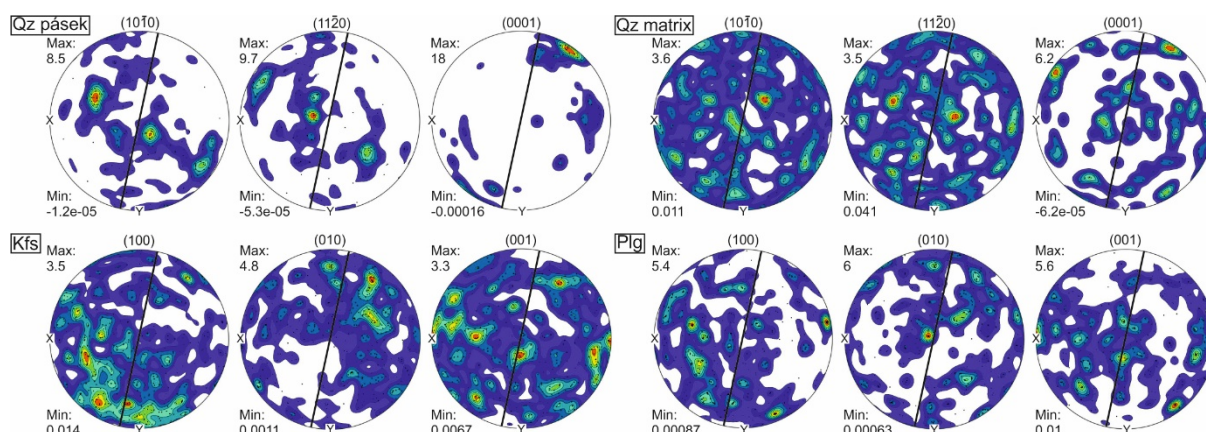
V případě CPO u křemene v pásku můžeme pozorovat shluklé maximum c-os na periférii diagramu, u a-os křemene v pásku jsou maxima rozptýlená (Obr. 59). Naopak u křemene v matrix CPO není pozorována vůbec, u draselného živce lze pozorovat maximum u a-os spíše na periférii diagramu a CPO zrn plagioklasu je náhodná s rozptýlenými maximy orientací os (Obr. 59).



Obr. 57. Data EBSD domény 2_1 kliváže I. (a) Území domény 2_1 s jednotlivými minerálními fázemi a neindexovanými poli. (b) Území po korekcích a rekonstrukci zrn bez neindexovaných polí. Mapy orientací zrn (c) Qz; (d) Kfs; (e) Plg. Inverzní pólové diagramy zkonstruované vůči ose z použité pro barvení map.



Obr. 58. Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 2_1 kliváže I.



Obr. 59. Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 2_1 kliváže I. Plná čára značí orientaci kliváže S2.

7.2 Kliváž I. – území domény 3_1

Původní data domény 3_1 si lze prohlédnout na Obrázku 60a. Po korekcích bylo možné vyobrazit mapu všech minerálních fází v konečné podobě (Obr. 60b). Mapy krystalografických orientací zrn křemene, draselného živce (složením ortoklas) a plagioklasu (složením oligoklas) lze nalézt na Obrázku 60c, d, e.

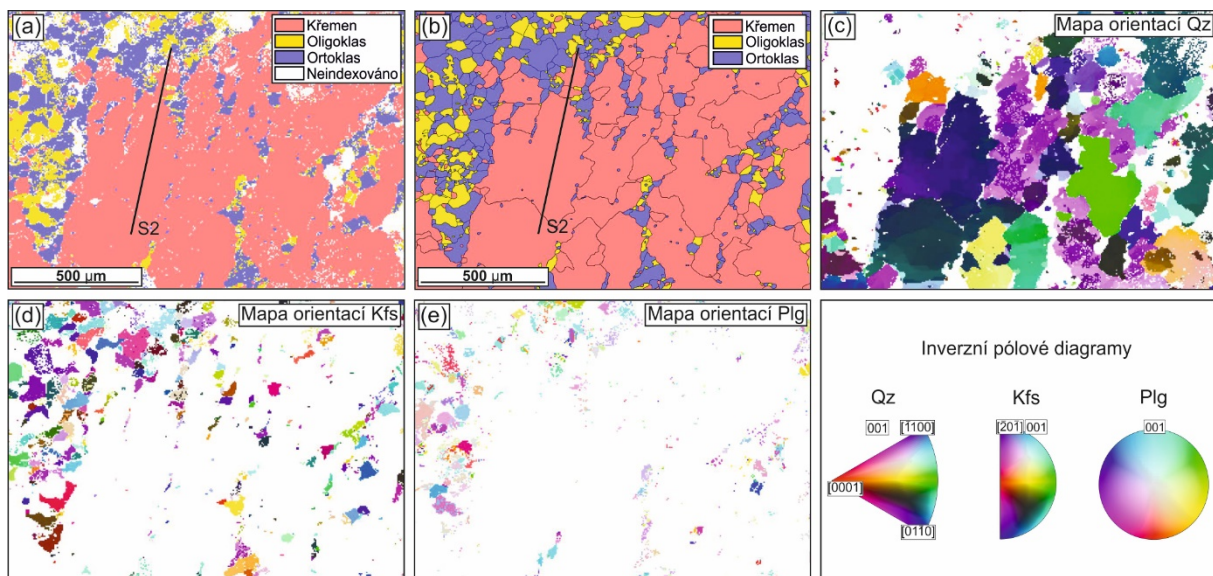
Pólové diagramy pro zrna křemene separovaná na zrna v pásku a v matrix (Obr. 61), pro zrna draselného živce a zrna plagioklasu si lze prohlédnout na Obrázku 62. Plná čára v diagramech značí orientaci kliváže S2 viditelnou z map viz Obrázek 60a, b.

V případě domény 3_1 jsou maxima os u křemene v pásku a u křemene v matrix rozptýlená (Obr. 62). Taktéž je tomu u draselného živce a plagioklasu, kde je CPO náhodná a v pólových diagramech můžeme pozorovat velice rozptýlená maxima orientací os (Obr. 62).

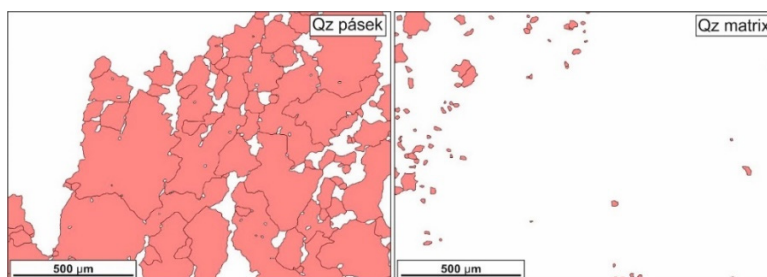
7.3 Kliváž I. – území domény 13_1

Území domény 13_1 je známé již z dřívějšího analyzování kvantitativní mikrostrukturní analýzou (viz výše). Původní data domény 13_1 si lze prohlédnout na Obrázku 63a. Po korekcích bylo možné vyobrazit mapu všech minerálních fází v konečné podobě (Obr. 63b). Mapy krystalografických orientací zrn křemene, draselného živce (složením ortoklas) a plagioklasu (složením oligoklas) lze vidět na Obrázku 63c, d, e.

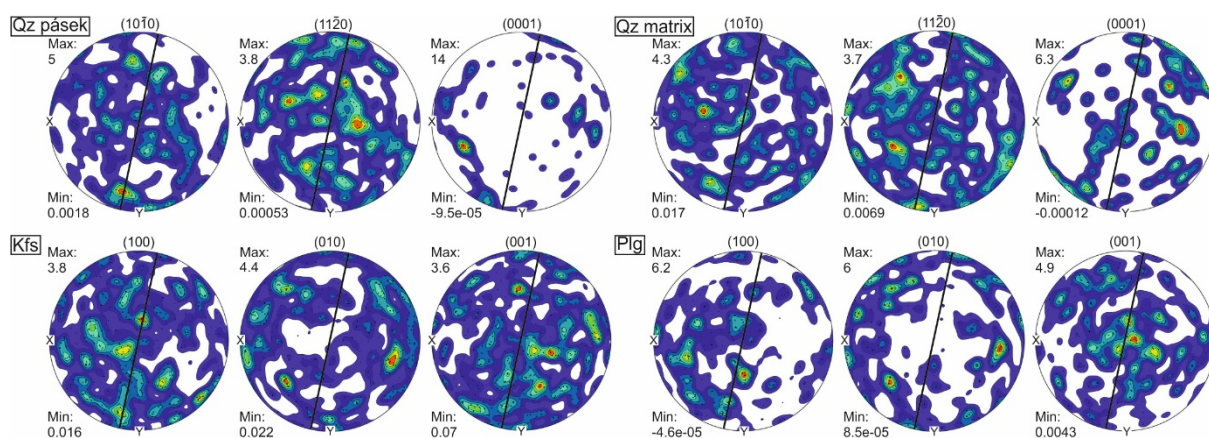
Pólové diagramy pro zrna křemene v matrix (Obr. 64), pro zrna draselného živce, plagioklasu a porfyroklast pertitu si lze prohlédnout na Obrázku 65. Plná čára v diagramech značí orientaci kliváže S2 (viz mapy na Obr. 63a, b).



Obr. 60. Data EBSD domény 3_1 kliváže I. (a) Území domény 3_1 s jednotlivými minerálními fázemi a neindexovanými poli. (b) Území po korekcích a rekonstrukci zrn bez neindexovaných polí. Mapa orientací zrn (c) Qz; (d) Kfs; (e) Plg. Inverzní pólové diagramy zkonstruované vůči ose z použité pro barvení map.

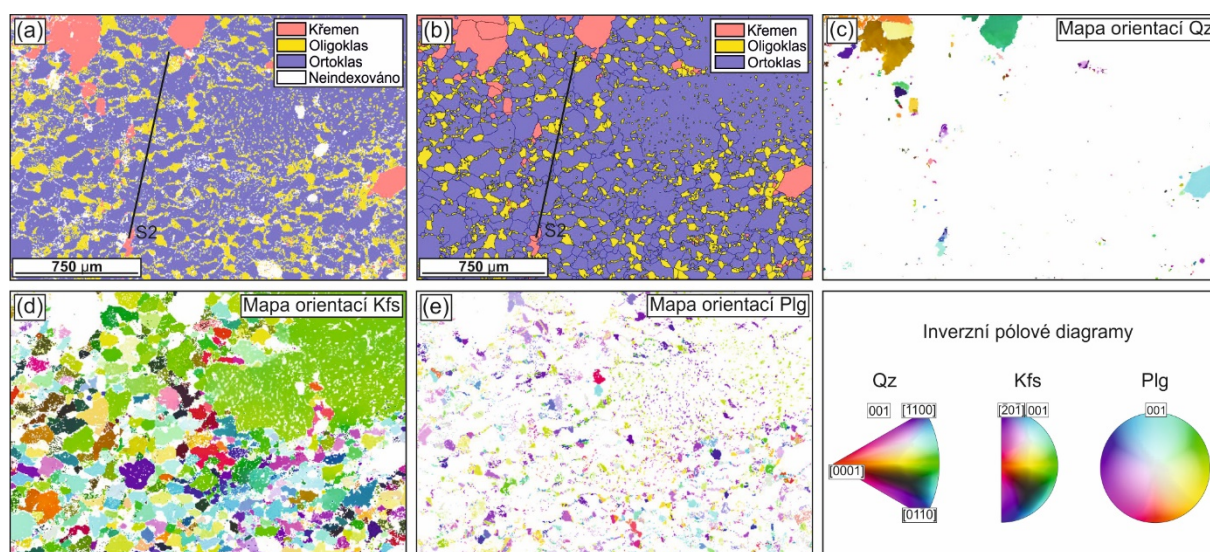


Obr. 61. Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 3_1 kliváže I.

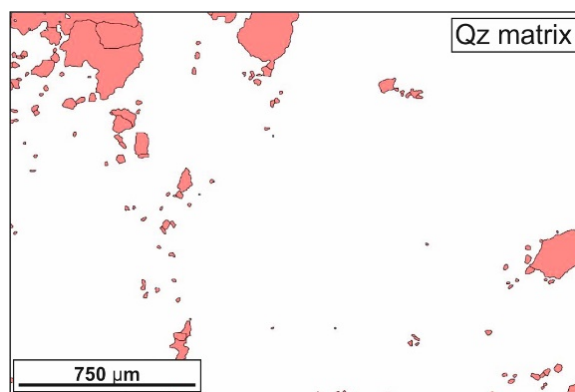


Obr. 62. Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 3_1 kliváže I. Plná čára značí orientaci kliváže S2.

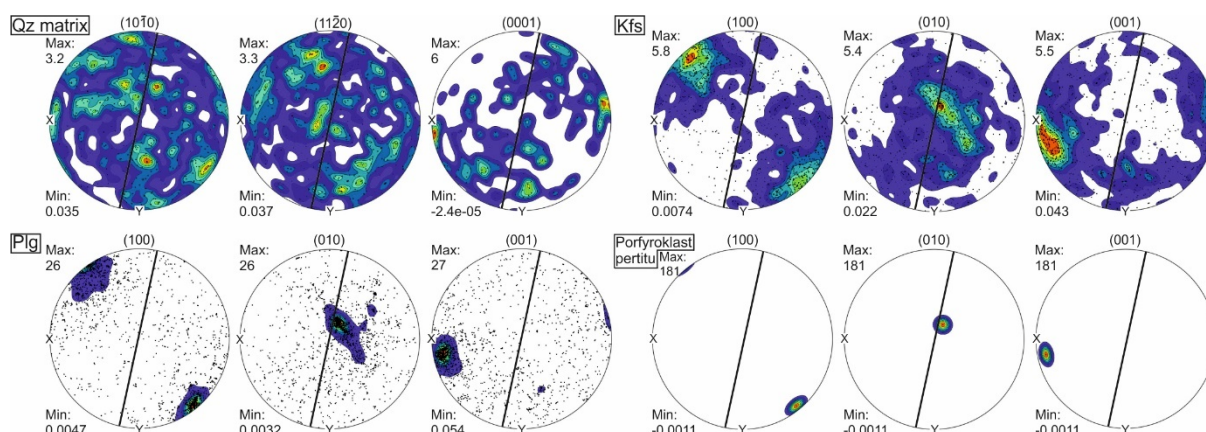
V případě domény 13_1 výsledné pólové diagramy ukazují, že u zrn křemene v matrix není CPO vyvinuta (Obr. 65). U draselného živce a plagioklasu je CPO v a-osách a c-osách definována pravidelnými silnými maximy orientací os na periférii diagramů (Obr. 65). Taktéž je tomu u b-os, kde jsou maxima orientována téměř ve středech diagramů (Obr. 65). Tato silná maxima draselného živce a plagioklasu jsou velice pravděpodobně způsobena zděděním orientace porfyroklastu pertitu. Z tohoto důvodu byla v pólových diagramech vynesena i původní orientace pouze tohoto porfyroklastu pertitu pro snadné porovnání (Obr. 65). Silná stavba u plagioklasu je také způsobena kvůli exolučním lamelám v pertitu, které jsou při vynášení diagramů brány jako jednotlivá zrna.



Obr. 63. Data EBSD domény 13_1 kliváže I. (a) Území domény 13_1 s jednotlivými minerálními fázemi a neindexovanými poli. (b) Území po korekcích a rekonstrukci zrn bez neindexovaných polí. Mapa orientací zrn (c) Qz; (d) Kfs; (e) Plg. Inverzní pólové diagramy zkonstruované vůči ose z použité pro barvení map.



Obr. 64. Distribuce křemenných zrn (Qz matrix) v doméně 13_1 kliváže I.



Obr. 65. Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v matrix, draselného živce, plagioklasu a porfýroklastu perlitu v doméně 13_1 kliváže I. Plná čára značí orientaci kliváže S2.

7.4 Kliváž II. – území domény 1_1

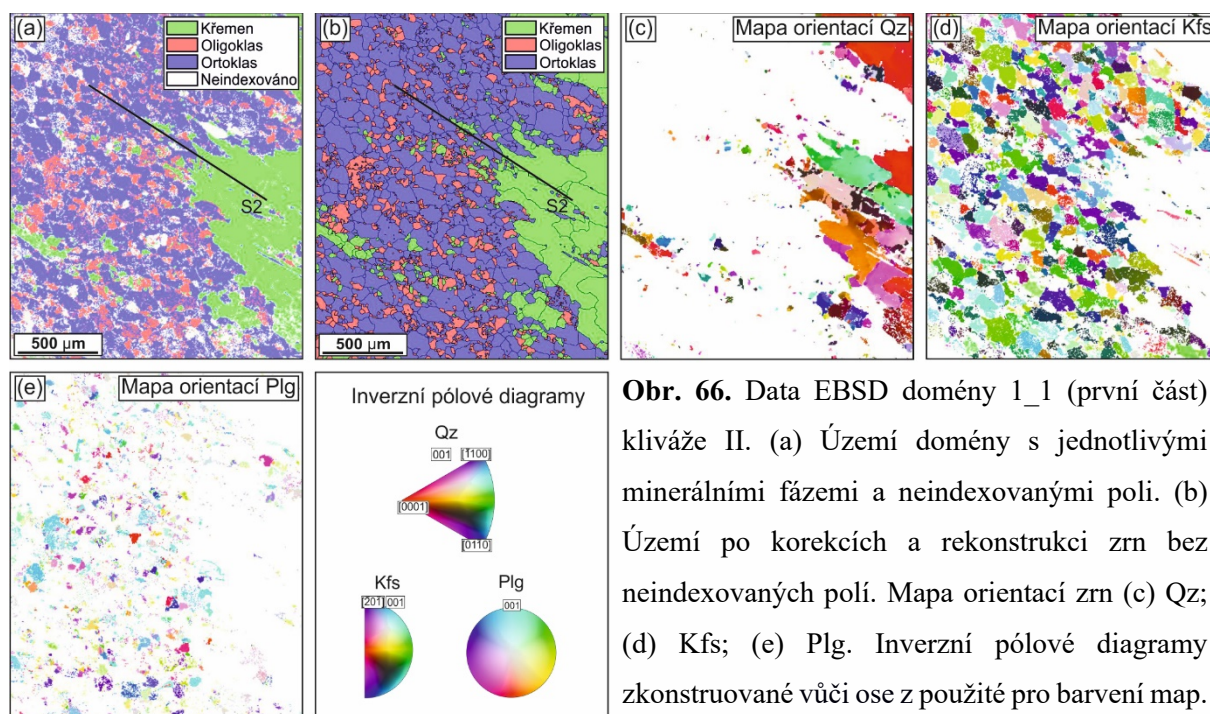
Území domény 1_1 je známé již z dřívějšího analyzování kvantitativní mikrostrukturní analýzou (viz výše). Území domény 1_1 bylo vybráno kvůli svému křemennému pásku přetínanému kliváží a z důvodu velkého území pro analyzování pomocí EBSD bylo rozděleno na dvě části.

7.4.1 První část domény 1_1

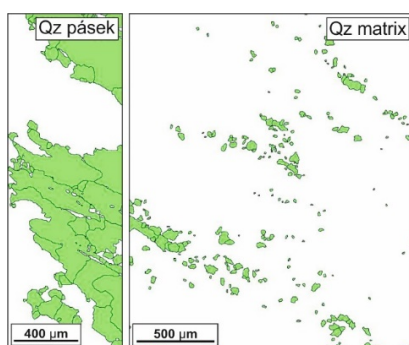
Původní data domény 1_1 (první část) si lze prohlédnout na Obrázku 66a. Po odstranění neindexovaných polí, po rekonstrukci zrn bez těchto polí a po dalších korekcích bylo možné vyobrazit mapu všech minerálních fází v konečné podobě (Obr. 66b). Mapy krystalografických orientací zrn křemene, draselného živce (složením ortoklas) a plagioklasu (složením oligoklas) lze nalézt v Obrázku 66c, d, e.

Pólové diagramy pro zrna křemene separovaná na zrna v pásku a v matrix (Obr. 67), pro zrna draselného živce a plagioklasu si lze prohlédnout v Obrázku 68. Plná čára v diagramech značí orientaci kliváže S2 viditelnou z map viz Obrázek 66a, b.

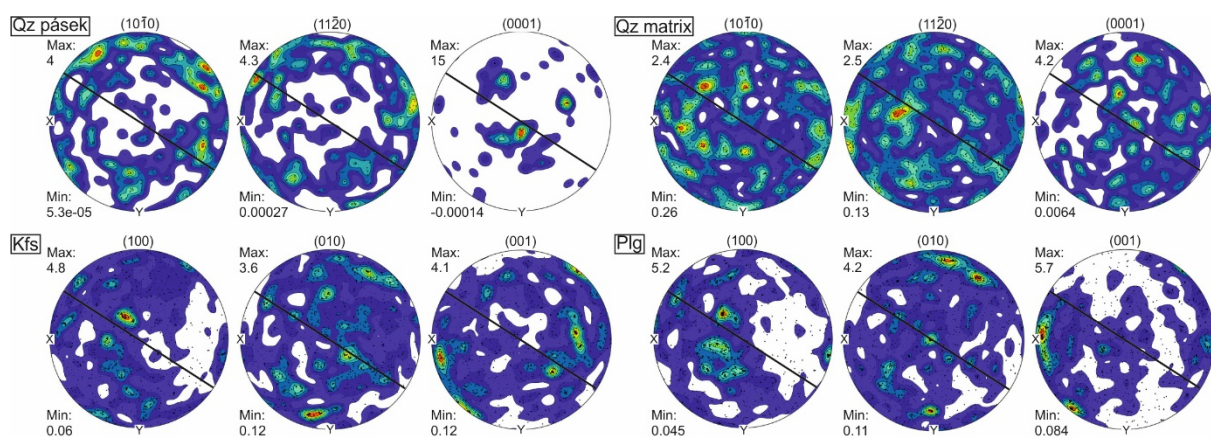
V případě domény 1_1 (první část) lze pozorovat u křemene v pásku vyvinutou CPO, kde se maxima a-os vyskytují na periférii pólových diagramů a maxima c-os jsou situována spíše ke středu diagramu (Obr. 68). U křemene v matrix a draselného živce je CPO náhodná s rozptýlenými maximy orientací os (Obr. 68). U zrn plagioklasu se maxima a-os vyskytují spíše u středu diagramu a maxima b-os a c-os jsou situována spíše na periférii diagramu (Obr. 68).



Obr. 66. Data EBSD domény 1_1 (první část) kliváže II. (a) Území domény s jednotlivými minerálními fázemi a neindexovanými poli. (b) Území po korekcích a rekonstrukci zrn bez neindexovaných polí. Mapa orientací zrn (c) Qz; (d) Kfs; (e) Plg. Inverzní pólové diagramy zkonstruované vůči ose z použité pro barvení map.



Obr. 67. Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 1_1 (první část) kliváže II.



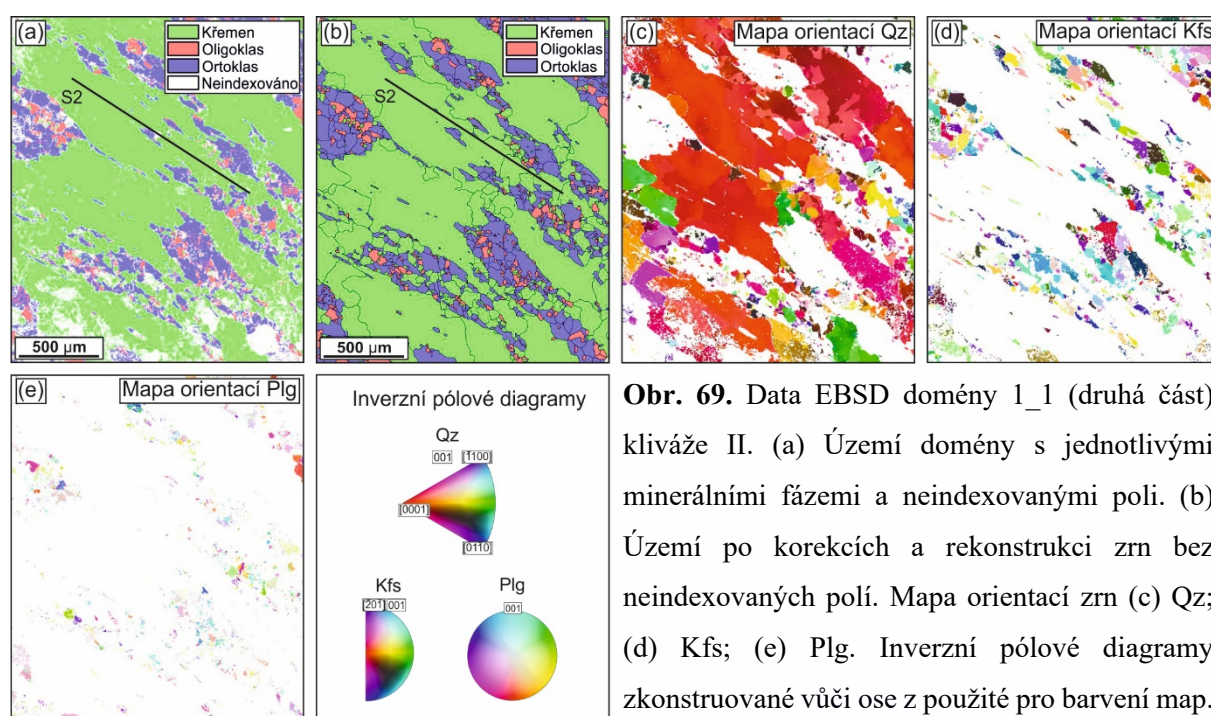
Obr. 68. Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 1_1 (první část) kliváže II. Plná čára značí orientaci kliváže S2.

7.4.2 Druhá část domény 1_1

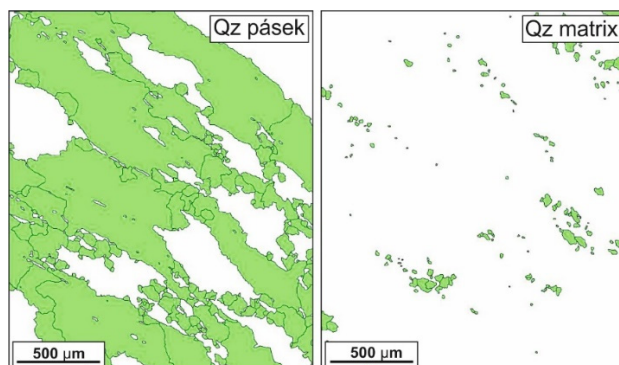
Původní data domény 1_1 (druhá část) si lze prohlédnout na Obrázku 69a. Po korekcích bylo možné vyobrazit mapu všech minerálních fází v konečné podobě (Obr. 69b). Mapy krystalografických orientací zrn křemene, draselného živce (složením ortoklas) a plagioklasu (složením oligoklas) lze vidět na Obrázku 69c, d, e.

Pólové diagramy pro zrna křemene separovaná na zrna v pásku a v matrix (Obr. 70), pro zrna draselného živce a plagioklasu si lze prohlédnout v Obrázku 71. Plná čára v diagramech značí orientaci kliváže S2 viditelnou z map viz Obrázek 69a, b.

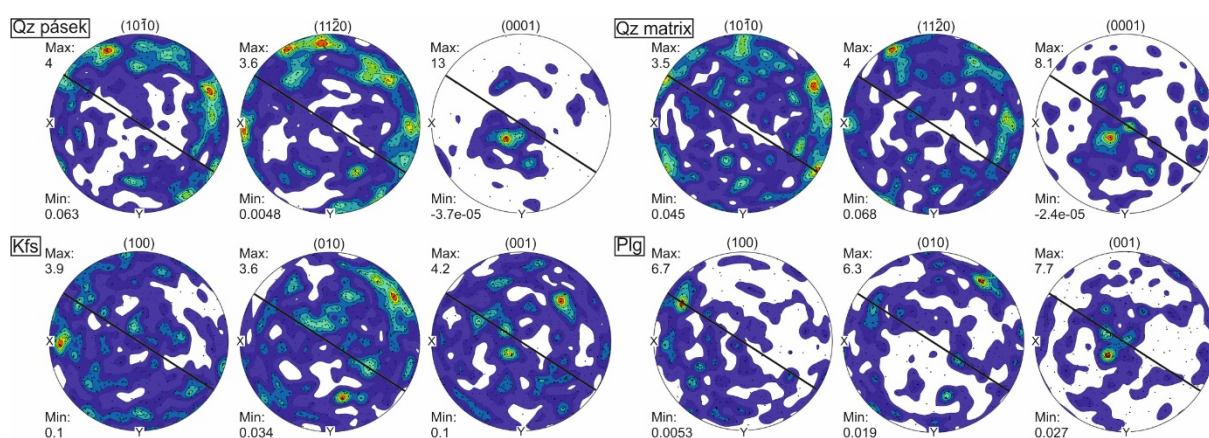
V případě domény 1_1 (druhá část) lze pozorovat u křemene v pásku vysoce vyvinutou CPO, kdy je pravidelně shluklé maximum c-os situováno téměř ve středu diagramu a maxima a-os křemene v pásku se vyskytují na periferii pólových diagramů (Obr. 71). U křemene v matrix se maximum a-os opět vyskytuje spíše na periferii diagramů a c-osy jsou situovány téměř ve středu (Obr. 71). U draselného živce je maximum b-os situováno spíše na periferii pólového diagramu (Obr. 71). U zrn plagioklasu lze pozorovat slabé maximum c-os téměř ve středu diagramu, jinak je však CPO náhodná s rozptýlenými maximy orientací os (Obr. 71).



Obr. 69. Data EBSD domény 1_1 (druhá část) kliváže II. (a) Území domény s jednotlivými minerálními fázemi a neindexovanými poli. (b) Území po korekcích a rekonstrukci zrn bez neindexovaných polí. Mapa orientací zrn (c) Qz; (d) Kfs; (e) Plg. Inverzní pólové diagramy zkonstruované vůči ose z použité pro barvení map.



Obr. 70. Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 1_1 (druhá část) kliváže II.



Obr. 71. Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 1_1 (druhá část) kliváže II. Plná čára značí orientaci kliváže S2.

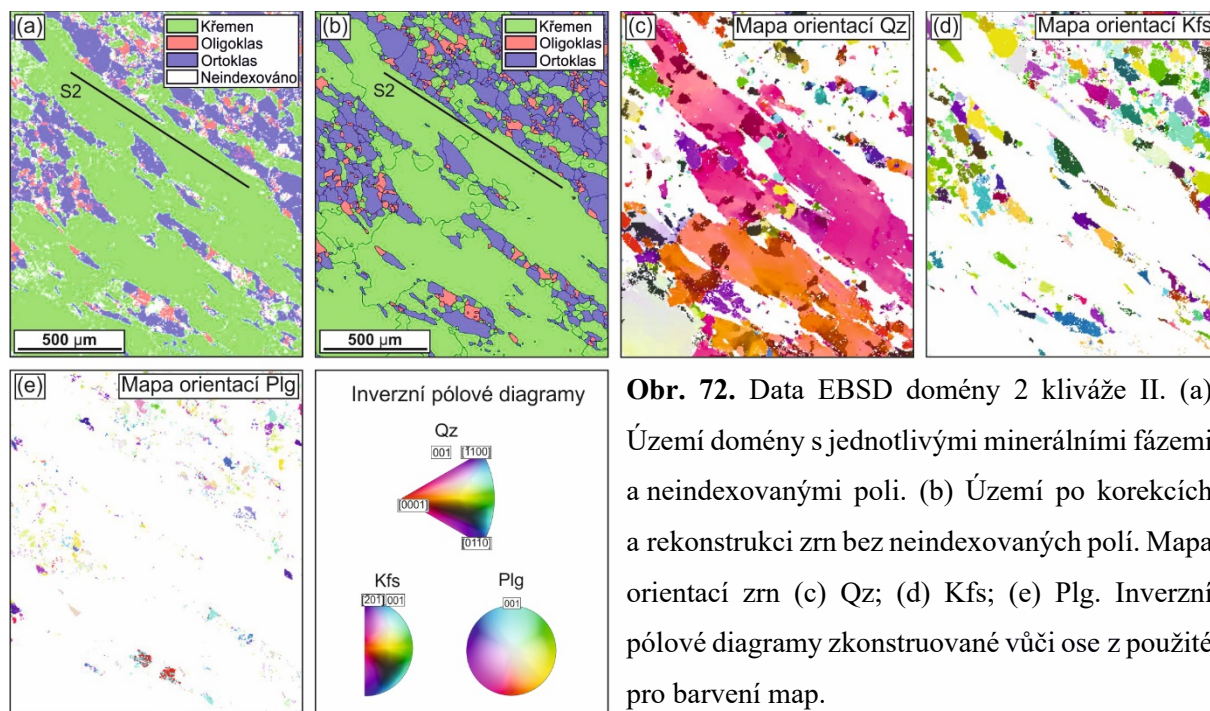
7.5 Kliváž II. – území domény 2

Původní data domény 2 si lze prohlédnout na Obrázku 72a. Po korekcích bylo možné vyobrazit mapu všech minerálních fází v konečné podobě (Obr. 72b). Mapy krystalografických orientací zrn křemene, draselného živce (složením ortoklas) a plagioklasu (složením oligoklas) lze nalézt na Obrázku 72c, d, e.

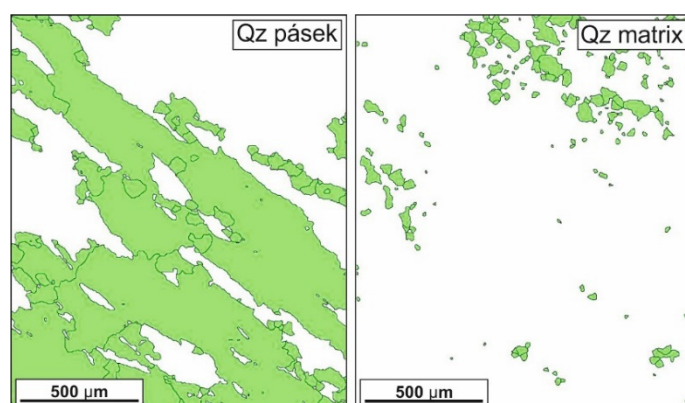
Pólové diagramy pro zrna křemene separovaná na zrna v pásku a v matrix (Obr. 73), pro zrna draselného živce a plagioklasu si lze prohlédnout v Obrázku 74. Plná čára v diagramech značí orientaci kliváže S2, která je viditelná z map viz Obrázek 72a, b.

V případě CPO v doméně 2 lze pozorovat, že u křemene v pásku jsou c-osy situovány spíše ke středu diagramu a a-osy tohoto křemene na periferii diagramů (Obr. 74). U křemene v matrix jsou maxima os rozptýlená (Obr. 74). U draselného živce lze pozorovat maxima a-os na periferii diagramu a maxima b-os jsou situována zhruba ve středu diagramu (Obr. 74). U zrn

plagioklasu je CPO náhodná s rozptýlenými maximy orientací os, avšak lze pozorovat slabé maximum a-os na periferii pólového diagramu (Obr. 74).



Obr. 72. Data EBSD domény 2 kliváže II. (a) Území domény s jednotlivými minerálními fázemi a neindexovanými poli. (b) Území po korekcích a rekonstrukci zrn bez neindexovaných polí. Mapa orientací zrn (c) Qz; (d) Kfs; (e) Plg. Inverzní pólové diagramy zkonstruované vůči ose z použité pro barvení map.

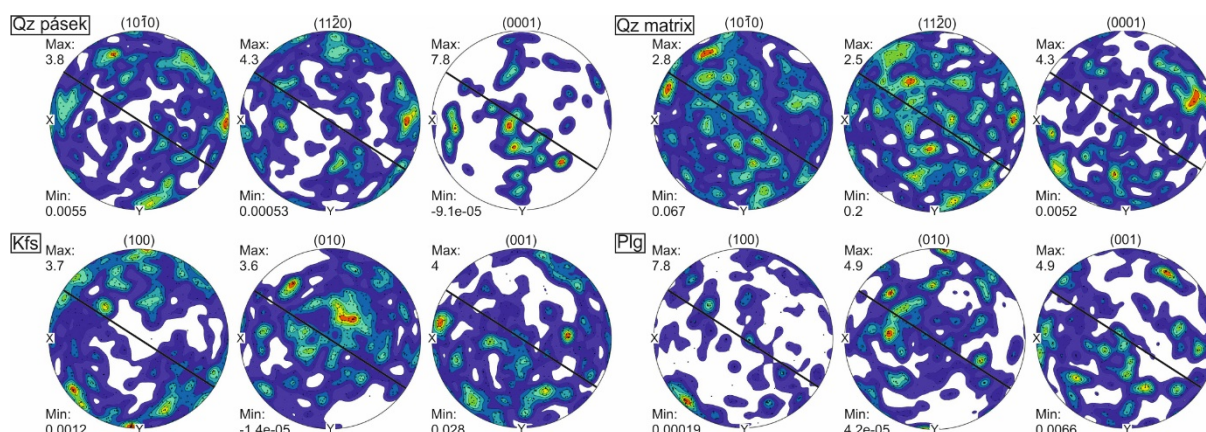


Obr. 73. Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 2 kliváže II.

7.6 Kliváž I. – území domény 6_3

Původní data domény 6_3 si lze prohlédnout na Obrázku 75a. Po korekcích bylo možné vyobrazit mapu všech minerálních fází v konečné podobě (Obr. 75b). Mapy krystalografických orientací zrn křemene, draselného živce (složením ortoklas) a plagioklasu (složením oligoklas) této domény lze nalézt na Obrázku 75c, d, e.

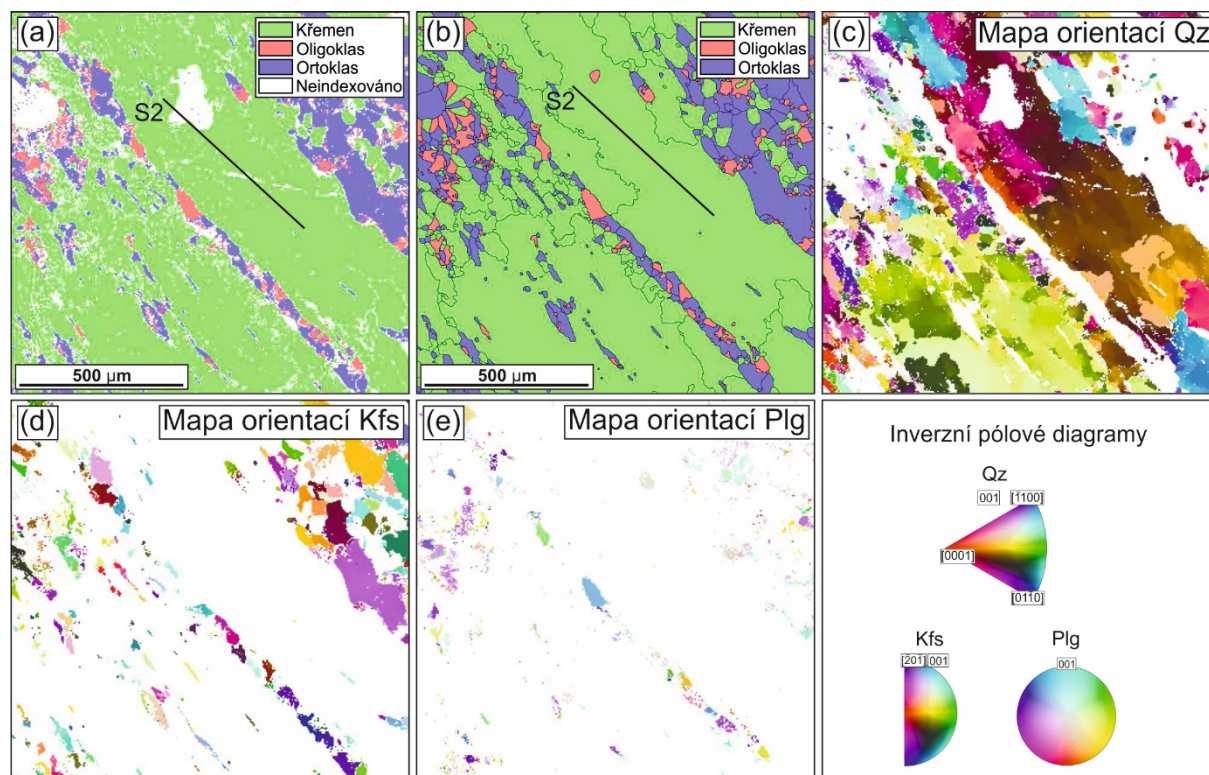
Pólové diagramy pro zrna křemene separovaná na zrna v pásku a v matrix (Obr. 76), pro



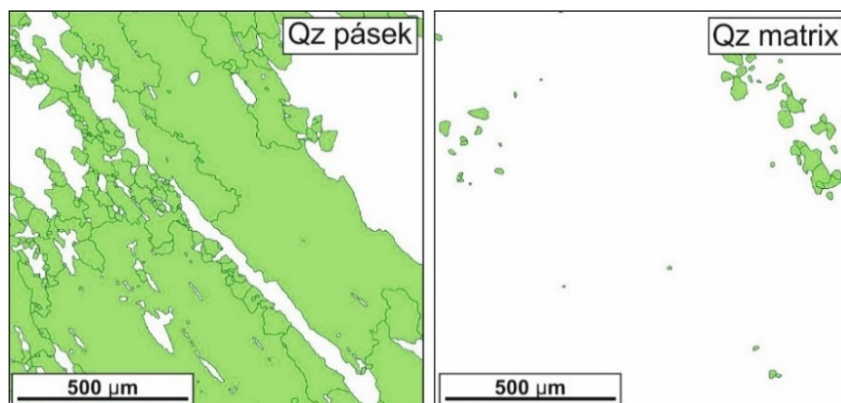
Obr. 74. Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 2 kliváže II. Plná čára značí orientaci kliváže S2.

zrna draselného živce a plagioklasu si lze prohlédnout na Obrázku 77. Plná čára v diagramech značí orientaci kliváže S2 viditelnou z map viz Obrázek 75a, b.

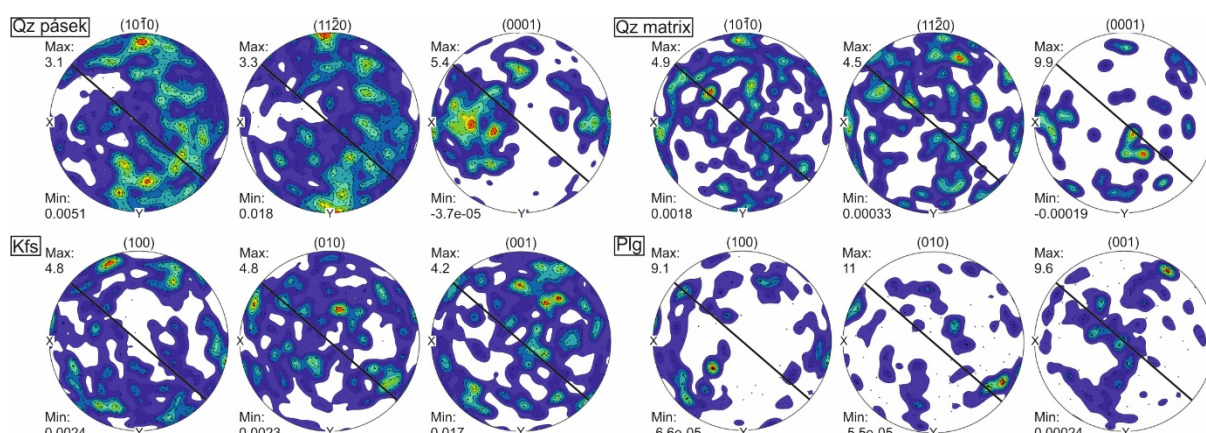
V případě CPO u křemene v pásku v doméně 6_3 můžeme pozorovat dobře viditelnou stavbu díky silným maximům orientací c-os a a-os (Obr. 77). U křemene v matrix, u draselného živce a plagioklasu CPO není vyvinutá a maxima orientací os jsou rozptýlená (Obr. 77).



Obr. 75. Data EBSD domény 6_3 kliváže II. (a) Území domény s jednotlivými minerálními fázemi a neindexovanými poli. (b) Území po korekcích a rekonstrukci zrn bez neindexovaných polí. Mapa orientací zrn (c) Qz; (d) Kfs; (e) Plg. Inverzní pólové diagramy (vůči ose z) použité pro barvení map.



Obr. 76. Separace křemenných zrn na zrna křemene v pásku (Qz pásek) a zrna křemene v matrix (Qz matrix) v doméně 6_3 kliváže II.



Obr. 77. Pólové diagramy vynášené z jednotlivých zrn (zrnová stavba s projekcí na svrchní polokouli) s krystalografickými orientacemi křemene v pásku a matrix, draselného živce a plagioklasu v doméně 6_3 kliváže II. Plná čára značí orientaci kliváže S2.

8. Rentgenová tomografie

Pro 3D analyzování pomocí rentgenové tomografie byly ze dvou zkoumaných vzorků OL1_Q (stádium kliváže I.) a H296 (stádium kliváže II.) vyhotoveny na Geofyzikálním Ústavu AV ČR, v. v. i. (Obr. 78) válečky o průměru 5 mm. Za tímto účelem bylo nutné vzorky zalít do sádry pro omezení nerovností jednotlivých ploch vzorků. Pětimilimetrové válečky byly následně ještě zbroušeny na průměr 2–3 mm v brusírně Přírodovědecké fakulty Karlovy Univerzity pro snadnější analyzování.

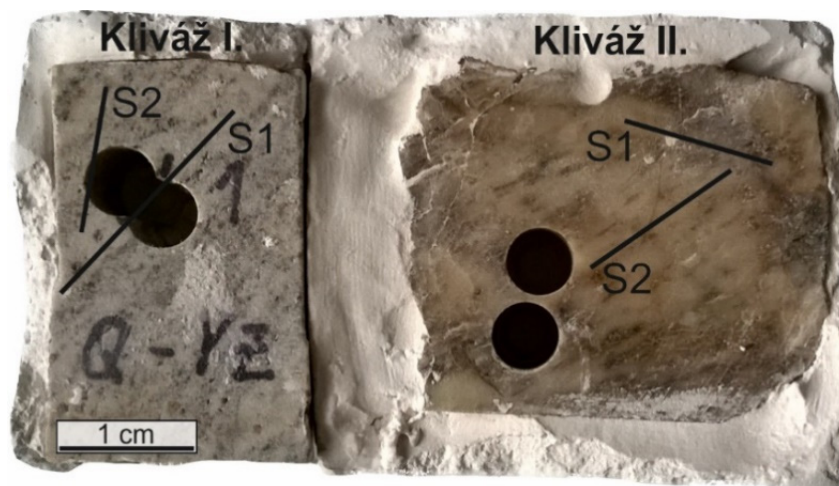
Válečky byly v obou případech vrtány kolmo ke kliváži S2 a vybraná území pro analyzování obsahovala křemenné pásy za účelem zdokumentování 3D distribuce a propojenosti klivážových domén. Pro další pozorování byly vybrány dva válečky, které byly

následně podrobeny analýze. Analyzování proběhlo v Laboratoři rentgenové tomografie na ÚTAM AV ČR, v. v. i. a získaná data byla zpracována za použití programu myVGL umožňující zobrazování 3D objektů.

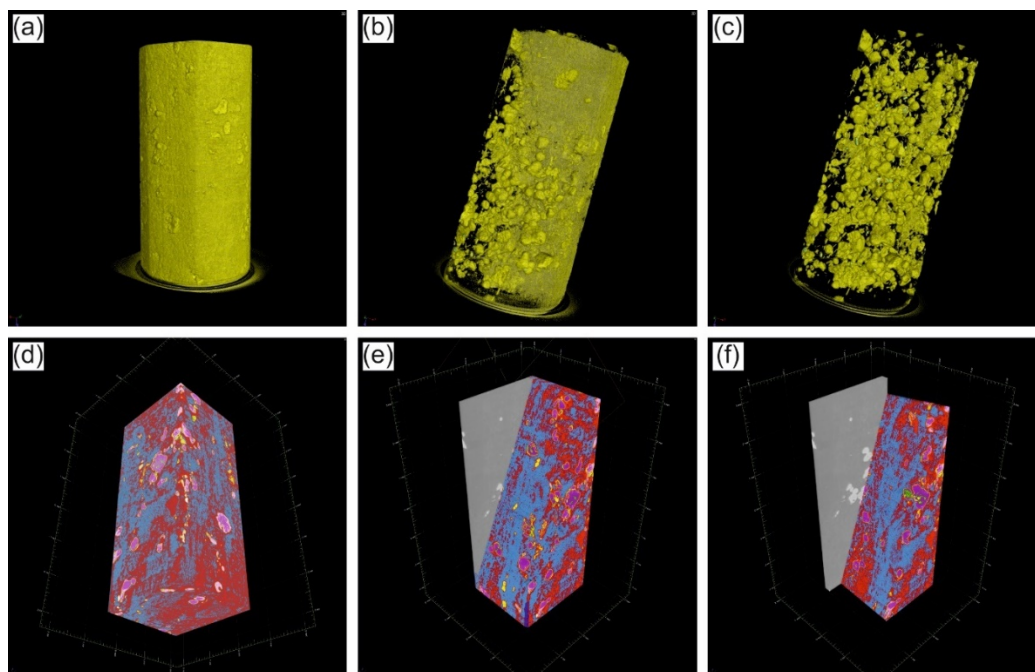
Pro vzorek OL1_Q (kliváž I.) bylo vytvořeno několik snímků zobrazujících vztah jemnozrnné dvouživcové matrix s ostatními minerály (Obr. 79a, b, c) a dále byly vytvořeny snímky s rozbarvením minerálních fází na základě intenzity zrn (Obr. 79d, e, f). Intenzita zrn je v tomto případě závislá na hustotě a na chemickém složení jednotlivých minerálních fází. Z důvodu podobné nebo stejné hustoty minerálních fází (kdy minerály jako křemen, plagioklas, draselný živec mají podobnou hustotu; taktéž minerály granát, kyanit a biotit) muselo být v některých případech rozbarvování provedeno podle vlastního úsudku.

Také pro vzorek H296 (kliváž II.) bylo vytvořeno několik snímků zobrazujících vztah dvouživcové matrix s ostatními minerály (Obr. 80a, b, c) a taktéž byly vytvořeny snímky s rozbarvením minerálních fází na základě intenzity zrn (Obr. 80d, e, f). Rozbarvování jednotlivých minerálů probíhalo stejným způsobem jako u vzorku předchozího.

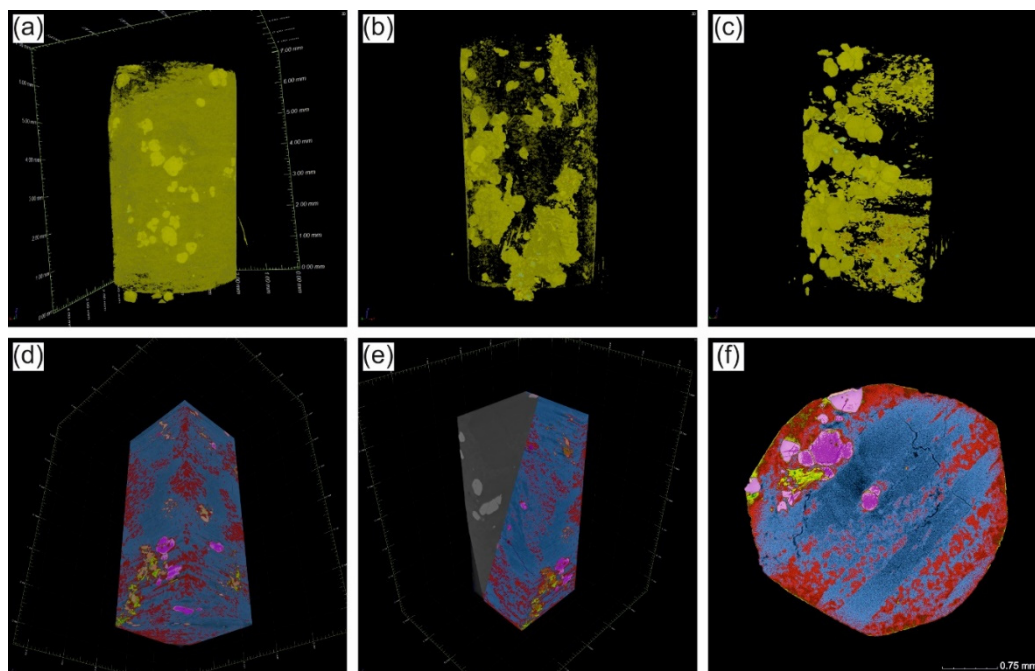
V závěru analyzování však snímky nepředstavují námi požadované výsledky, i přesto ale byly v práci zdokumentovány a ponechány alespoň pro lepší představu, jak vzorky studovaných granulitů vypadají nejen ve 2D ale i ve 3D profilu.



Obr. 78. Vzorky OL1_Q (kliváž I.) a H296 (kliváž II.) použité pro zhotovení válečků o průměru 5 mm zalité sádrou pro omezení nerovností jednotlivých ploch.



Obr. 79. Snímky rentgenové tomografie vzorku OL1_Q (kliváž I.). (a, b, c) Vztah jemnozrnné matrix s ostatními minerály. (d) Snímek s rozbarvenými minerálními fázemi ve vzorku z pohledu zespodu zprava. (e, f) Průřez vzorkem s rozbarvenými minerálními fázemi. Barvy: křemen – modrá, matrix – červená, granát – růžová, biotit – žlutá, akcesorické minerály – zelená.



Obr. 80. Snímky rentgenové tomografie vzorku H296 (kliváž II.). (a, b, c) Vztah jemnozrnné matrix s ostatními minerály. (d) Snímek s rozbarvenými minerálními fázemi ve vzorku z pohledu zespodu zprava. (e) Průřez vzorkem s rozbarvenými minerálními fázemi. (f) Řez středem vzorku s křemenným pásem a dalšími rozbarvenými minerálními fázemi. Barvy: křemen – modrá, matrix – červená, granát – růžová, biotit – žlutá, akcesorické minerály – oranžová, zelená.

9. Interpretace a diskuze

Předkládaná práce je zaměřena na nejstarší rozpoznanou deformační mikrostrukturu granulitů Blanského lesa za účelem pochopení deformační historie těchto hornin v podmínkách spodní kůry, tzn. tedy před jejich následnou modifikací během exhumace. Studium mikrostruktur bylo zejména zaměřeno na vznik destičkových křemenů a na rozpad ternárních živců v proto-stádiu vývoje granulitů, které v této práci interpretuji jako synchronní události.

9.1 Interpretace výsledků chemické analýzy živců, živcové termometrie a rozpadu živců

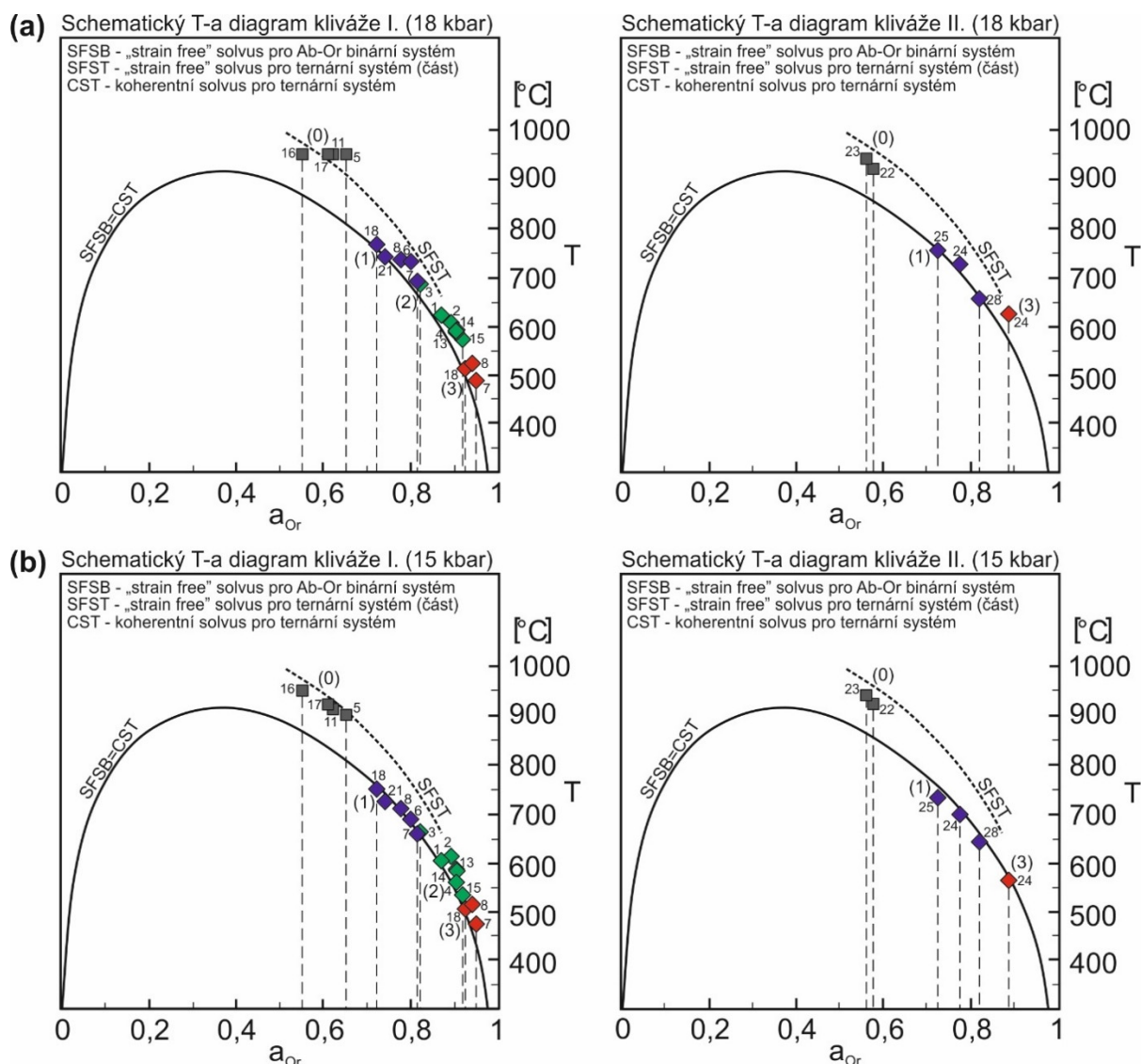
9.1.1 Pravděpodobný teplotní vývoj odmíšení dvouživcové matrix a exolučních lamel

Z výsledků živcové termometrie bylo možné rozlišit a za sebou seřadit tři stadia rozpadu živců a pro tyto rozpady byly určeny pravděpodobné teploty odmíšení.

U kliváže I. vzniká primární odmíšení dvouživcové matrix pravděpodobně okolo 800–860 °C zřejmě během vysokotlaké fáze, kdy integrované složení dvouživcové matrix (Obr. 81 (0)) protne ternární koherentní solvus (CST). Sledujeme-li dále koherentní ternární solvus do nižších teplot, dochází k tomu, že primární odmíšení je následováno vytvořením a hrubnutím plagioklasových odmíšenin ve zbytkových porfyroklastech ternárního živce (z nichž touto pertitizací následně vznikají porfyroklasty pertitu, Obr. 81 (2)) zhruba okolo 500–650 °C/18kbar a v pertitech vzniklých rozpadem draselného živce ve dvouživcové matrix (Obr. 81 (3)) za nejnižších určených teplot, a to okolo 430–490 °C/18kbar.

U kliváže II. pozorování ukazuje, že primární odmíšení dvouživcové matrix vzniká okolo 850–860 °C (Obr. 81 (0)). I zde předpokládám, že je dále primární odmíšení následováno vytvořením a hrubnutím plagioklasových odmíšenin ve zbytkových porfyroklastech ternárního živce, avšak absence takto vzniklých porfyroklastů pertitu ve výbrusu neumožňuje přesné určení teplot. Vytvoření a hrubnutí plagioklasových odmíšenin v pertitech vzniklých rozpadem draselného živce ve dvouživcové matrix probíhá za nejnižších určených teplot, a to zhruba okolo 570 °C/18kbar (Obr. 81 (3)).

T-a diagram (Obr. 81a, b) představuje systém neobsahující anortitovou složku, a proto není vhodný pro kvantitativní prezentaci intervalu od maximálních teplot do vzniku prvního odmíšení. Binární diagram T-a lze použít pro zobrazení vývoje pertitu během chlazení až poté, co je anortitová složka frakcionována do primárního odmíšení, takže zůstává hostitelské zrno bohaté na ortoklas (bez anortitu). Systém s An je proto vyobrazen na základě předpokladu, že koherentní solvus pro ternární systém (CST) přibližně odpovídá „strain-free“ solvu pro binární systém (SFSB).



Obr. 81. Jednotlivá stádia mikrostrukturního vývoje pertitu pro tlaky (a) 18 kbar a (b) 15 kbar. „Strain free“ solvus pro Ab-Or binární systém je vypočítán pomocí modelu Fuhrman a Lindsley (1988). (0) Šedý čtverec – integrované složení dvouživcové matrix; (1) modrý kosočtverec – složení zrn draselného živce ve dvouživcové matrix; (2) zelený kosočtverec – složení draselného živce v zrnech porfyroklastu pertitu; (3) červený kosočtverec – složení draselného živce v zrnech pertitu v matrix I.

9.1.2 Výsledky chemické analýzy živců a živcové termometrie

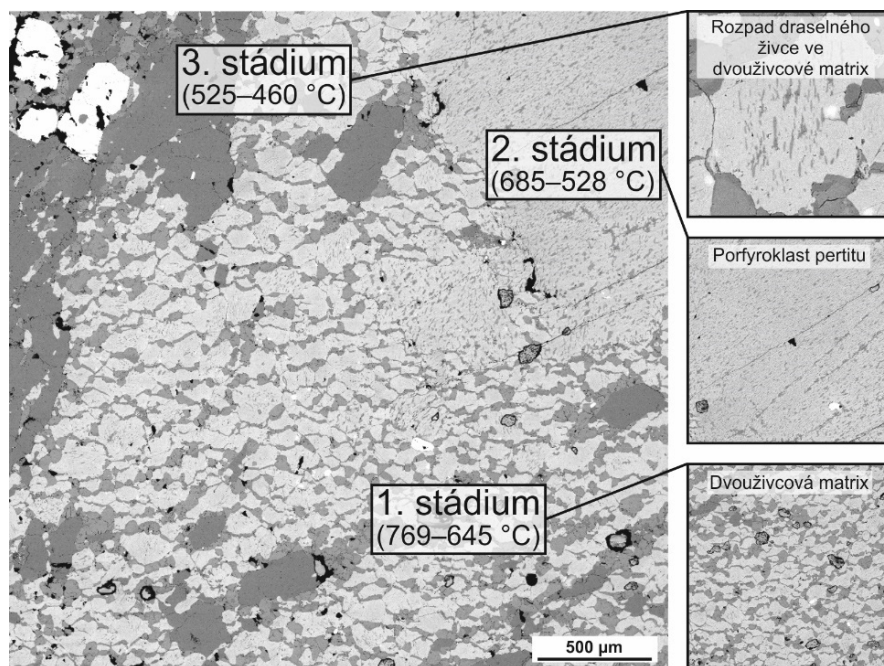
Jak již bylo řečeno, z výsledků živcové termometrie bylo možné rozlišit a za sebou seřadit tři stádia rozpadu živců. Byl zjištěn kontinuální pokles teplot, což reflektují jednotlivé mikrostruktury, a to tak, že (1) první předpokládaný rozpad nastal zřejmě za vysokých teplot, kdy se část ternárních živců rozpadla na zrna draselného živce a zrna plagioklasu ve dvouživcové matrix. (2) Později za nižších teplot došlo během druhého stádia k rozpadu zbytkových porfyroklastů ternárních živců na pertity s exolučními lamelami, tzn., že tyto zbytkové ternární živce podlehly pertitizaci a vznikly porfyroklasty pertitu. (3) Během třetího

stádia se začal rozpadat draselný živec ve dvouživcové matrix. Tento draselný živec začal při dalším poklesu teploty vytvářet pertitové odmišleniny a vznikl další pertit. Z výpočtů rovnovážných teplot uvedených v práci výše lze tedy pozorovat postupný pokles teploty od předpokládaného prvního stádia rozpadu po poslední třetí stádium (Obr. 82) a toto pozorování tedy interpretuji jako sled vzniku různých živcových mikrostruktur.

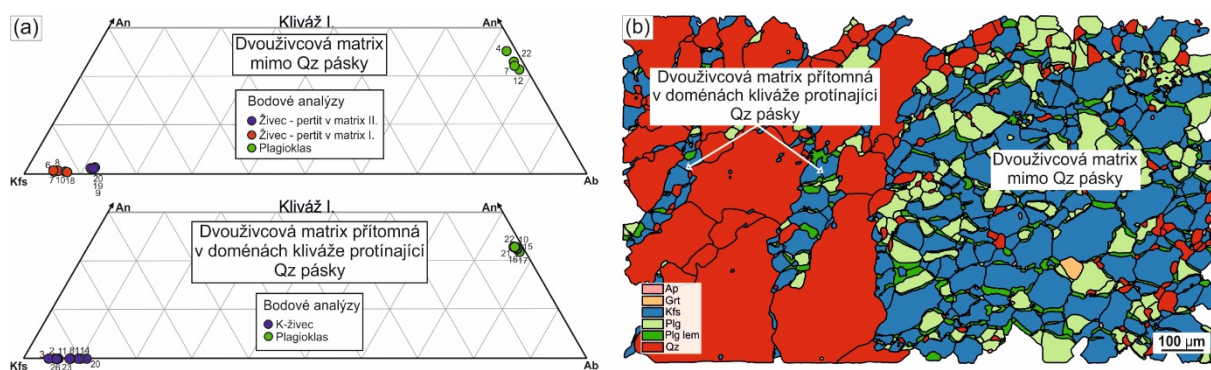
Výše zmíněné potvrzuje studie chemické analýzy živců, kde bylo měřeno integrované složení dvouživcové matrix za účelem zjistit, zda tento chemismus odpovídá chemismu porfyroklastu pertitu. Aby bylo možné porovnat chemismy těchto živců, bylo nutné se při měření integrovaných analýz vyhnout doménám se zrny vtroušeného křemene ve dvouživcové matrix. Výsledky naměřených analýz ukazují, že chemismus porfyroklastu pertitu je shodný s chemismem integrovaného složení dvouživcové matrix (Obr. 21a, b, c), což potvrzuje, že integrované složení dvouživcové matrix odpovídá integrovanému složení původních ternárních živců a že tedy došlo k rozpadu ternárního živce na dvouživcovou matrix. Také z chemismů jednotlivých pertitů v matrix naměřených plošnými analýzami můžeme vidět, že tato zrna mají jiné složení než porfyroklast pertitu (Obr. 21a, b, c), což naznačuje, že tato malá zrna v matrix jsou opravdu další generací pertitů.

Měřené analýzy dále dokazují, že chemické složení draselného živce a plagioklasu (tzn. dvouživcové matrix) u kliváže I. i u kliváže II. je shodné jak u dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže protínající křemenné pásy, tak ve dvouživcové matrix mimo tyto křemenné pásy (Obr. 83a). Z tohoto pozorování předpokládám, že se jedná o jednu a tu samou mikrostrukturu (Obr. 83b), která vznikla ve stejný moment, což znamená propojení chemického a deformačního procesu, tedy že rozpad porfyroklastů ternárního živce na dvouživcovou matrix se odehrál ve stejný moment jako vznik kliváže.

Toto výše zmíněné pozorování a interpretování rozpadu ternárních živců souhlasí s pozorováním Fraňka et al. (2011b), kdy autoři taktéž prezentují velké pertitické živce (porfyroklasty pertitu) jako mikrostruktury vzniklé rozpadem původně ternárních živců. Avšak pozorování se rozchází v tom, že podle Fraňka et al. (2011b) tyto pertitické živce prodělaly proces rozpadu vedoucího ke vzniku jemnozrné dvouživcové matrix, a to během exhumace. Podle těchto autorů je progresivní rekrytalizace původní hrubozrné mikrostruktury ternárních živců do jemnozrné dvouživcové matrix popisována jako vznik granulárních domén uvnitř a na okrajích velkých pertitických živců.



Obr. 82. Ukázka předpokládaného rozpadu živců s vypočtenými rovnovážnými teplotami z kliváže I. Rozpad porfyroklastu ternárního živce na zrna draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix (1. stádium), rozpad reliktů porfyroklastu ternárního živce (2. stádium) a rozpad draselnějších živců ve dvouživcové matrix (3. stádium). Použito území z oblasti 13_1 z kliváže I.



Obr. 83. Názorná ukázka z kliváže I. (a) ternárních diagramů s chemismy dvouživcové matrix mimo křemenné pásy a s chemismy dvouživcové matrix přítomné v doménách kliváže protínající křemenné pásy a (b) digitalizované mikrostruktury zobrazující dvouživcovou matrix v doménách kliváže protínající křemenné pásy a dvouživcové matrix mimo křemenné pásy.

9.1.3 Porovnání maximálních vypočtených teplot s předchozími P-T odhady

Výpočtené maximální teploty z integrovaného složení dvouživcové matrix (viz kapitola Živcová termometrie pro výpočet rovnovážné teploty živců) u kliváže I. ukázaly, že ternární živec byl stabilní za vysokých teplot v rozsahu 900–950 °C za tlaků 15 kbar a že za tlaků 18 kbar se teploty pohybovaly nepatrně výše. U kliváže II. byl ternární živec stabilní za teplot

v rozsahu zhruba 920–940 °C za tlaků 15 kbar a pro 18 kbar byly vypočteny teploty zhruba podobné. Toto pozorování se shoduje s maximálními odhadovanými teplotami v práci Tajčmanové et al. (2011), kde autoři odhadují maximální teploty z integrovaného složení pertitického zrna na 900–950 °C pro 18 kbar a s prací Štípské et al. (2014), kde autoři navrhuji teploty 950 °C pro tlakové rozmezí od 20 do 12,5 kbar. Naopak Franěk et al. (2011b) na základě termodynamického modelování určili vrcholné podmínky o něco nižší, a to na 850–880 °C pro ~16–18 kbar.

9.2 Interpretace výsledků kvantitativní mikrostrukturní analýzy

9.2.1 Přednostní orientace minerálních fází (SPO zrn)

U kliváže I. v doméně mapy 1 a 3 mají jednotlivá zrna minerálních fází vyvinutou spíše slabou SPO zrn. V doméně mapy 1 svírala SPO zrn křemene v pásku s osou y (viz Obr. 36) úhel zhruba 65° a u zrn křemene v matrix byla v obou doménách map SPO těchto zrn všesměrně orientovaná. U zrn draselného živce, plagioklasu a jeho plagioklasových lemů bylo možné vidět ve většině případů SPO zrn téměř kolmou na kliváž.

U kliváže II. v doméně mapy 2 mají zrna jednotlivých minerálů silně vyvinutou SPO a průměrná SPO zrn křemene v pásku a v matrix, draselného živce, plagioklasu a lemů byla orientována ve směru kliváže, tzn. paralelně s kliváží.

9.2.2 Přednostní tvarová orientace hranic zrn (SPO hranic zrn) a plagioklasové (albitové) lemy

Podle Tajčmanové et al. (2012) vznikaly albitové lemy v pozdní fázi petrogenetické historie po vývoji matrix, proto tedy v rámci analýzy hranic zrn byla uvažována i tzv. původní dvouživcová matrix s absencí těchto albitových lemů okolo zrn plagioklasu (tzn. kontakty hranic „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“).

U domény mapy 1 kliváže I. byla průměrná SPO hranic zrn „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ zhruba kolmá na kliváž (viz Obr. 38; vůči ose y zhruba v úhlu 85°) a podobná orientace maxima SPO těchto hranic zrn byla vypočítána i metodou SURFOR (zhruba 90°). SPO hranic zrn „Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz“ a hranic „Kfs-Kfs“ byla téměř paralelní s kliváží a u hranic „Kfs-Plg lem, Plg-Plg lem“ bylo možné vidět SPO kvůli růstu albitových lemů, jež byla orientována kolmo na kliváž.

U domény mapy 3 kliváže I. průměrná SPO hranic „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ byla orientována vůči ose y (viz Obr. 46) v úhlu 60°, avšak metodou SURFOR byla vypočítána orientace maxima SPO hranic této původní matrix na zhruba 75°, což znamená opět téměř kolmost na kliváž. SPO hranic zrn „Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz“ a hranic zrn „Kfs-Kfs“ byla

paralelní s kliváží jako u mapy 1 a SPO hranic „Kfs-Plg lem, Plg-Plg lem“ měla charakter opět kolmý na kliváž.

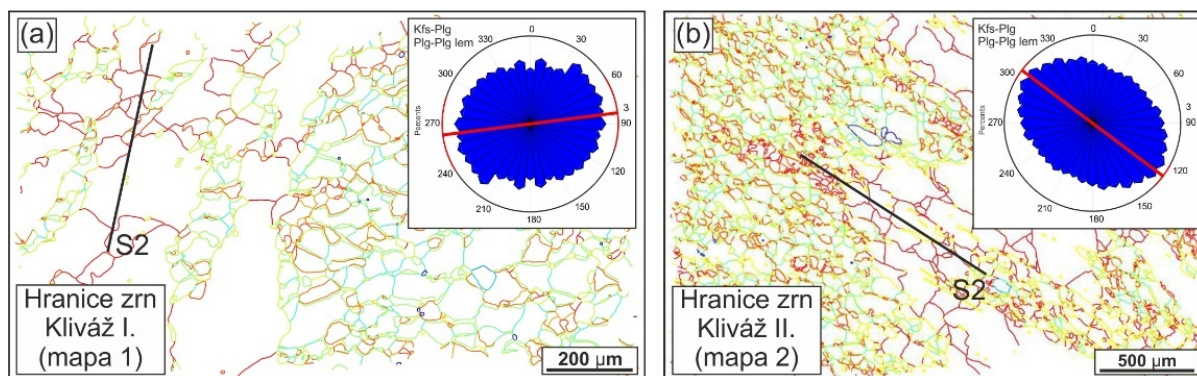
V případě SPO hranic zrn kliváže II. v doméně mapy 2 bylo možné pozorovat silněji vyvinutou SPO těchto hranic zrn než u kliváže I. SPO hranic „Kfs-Plg, Plg-Plg lem“ byla paralelní s kliváží (viz Obr. 54; vůči ose y zhruba v úhlu 130°) a metodou SURFOR byla vypočítána stejná orientace maxima SPO hranic této původní matrix (zhruba 130°). SPO hranic zrn „Plg-Qz, Kfs-Qz, Plg lem-Qz“ a „Kfs-Plg lem, Plg-Plg lem“ byla taktéž v orientaci kliváže.

Z výsledků analýz SPO hranic zrn lze tedy říci, že při vzniku původní dvouživcové matrix (bez přítomnosti plagioklasových lemů albitového složení) je vidět SPO hranic této matrix, avšak toto pozorování je v rozporu s Fraňkem et al. (2011b), kde autory žádná SPO těchto hranic zrn pozorována nebyla.

Z analýz provedených u kliváže I. je také zřejmé, že tvarové přednostní orientaci dominuje plagioklasový (albitový) lem, avšak po jeho eliminaci lze pozorovat, že kontakty hranic plagioklasu a draselného živce v nejstarší původní dvouživcové matrix (tedy první rozpad viz předchozí kapitola Interpretace výsledků živcové termometrie a rozpadu živců) jsou zhruba **kolmé** na kliváž (Obr. 84a). U kliváže II. lze pozorovat po eliminaci tohoto plagioklasového lemu, že kontakty hranic plagioklasu a draselného živce v původní dvouživcové matrix jsou **paralelní** s kliváží (Obr. 84b), což je způsobeno z důvodu narůstající deformace. Kolmost na kliváž v tomto případě tedy mizí, v čemž je výrazný rozdíl v porovnání s kliváží I.

Jak již bylo řečeno, u kontaktů hranic „Kfs-Plg lem, Plg-Plg lem“ bylo možné sledovat silnou přednostní orientaci kvůli růstu albitových lemů. Tyto albitové lemy pravděpodobně využívaly pro svůj růst již existující SPO hranic vznikající při rozpadu ternárních živců na dvouživcovou matrix. Růst plagioklasových (albitových) lemů pak tuto SPO znásobuje.

Analýzy dále ukazují, že se výrazně liší SPO hranic zrn pro rozhraní jednotlivých fází (fázová SPO) a pro rozhraní stejné fáze (zrnová SPO). Zrnová SPO není mnohdy vůbec pozorována na rozdíl od fázové SPO, která je většinou dobře vyvinuta. Nejlépe lze tento fenomén pozorovat u kliváže I. (viz Obr. 38, 46), kdy SPO hranic zrn stejné fáze („Plg-Plg“ a „Qz-Qz“) tvoří v růžicových diagramech všesměrně orientovaný charakter směrového rozložení četnosti zrn. U kliváže II. je tento fenomén vidět např. na kontaktu hranic zrn „Kfs-Kfs“ (viz Obr. 54). Avšak kontakty hranic „Kfs-Kfs“ u kliváže I. jsou výjimkou, zde je totiž tato zrnová SPO vyvinuta a je kolmá k fázové SPO. Fázová SPO je paralelní s původní SPO hranic zrn, což je v souladu a podpůrné k původní SPO hranic zrn.



Obr. 84. Schematická ukázka vztahu orientace kliváže S2 vůči orientaci SPO hranic zrn původní dvouživcové matrix bez albitových lemů (a) u kliváže I. (doména mapy 1) a (b) u kliváže II. (doména mapy 2).

9.3 Interpretace výsledků EBSD

U kliváže I. nebyla CPO u zrn křemene v pásku ve většině případů pozorována nebo byla slabá a CPO zrn křemene v matrix nebyla pozorována vůbec. U zrn draselného živce a plagioklasu kliváže I. také nebyla CPO pozorována (s výjimkou domény 13_1, kde silná maxima u živců jsou pravděpodobně způsobena zděděním orientace porfyrroklastu pertitu).

Naopak u kliváže II. lze u zrn křemene v pásku sledovat dobře vyvinutou CPO s množstvím silných maxim, u zrn křemene v matrix byla CPO slabá nebo nebyla vyvinuta vůbec. V některých případech byla pozorována slabě vyvinutá CPO u zrn draselného živce a plagioklasu.

9.4 Interpretace vzniku destičkových křemenů – vztah tavení, rozpadu živce a deformace se vznikající kliváží

Ze studie CPO jednotlivých minerálů si bylo možné všimnout, že křemen v matrix nemá ve většině případů žádnou CPO. Tato všesměrná krystalografická orientace křemene v matrix by se dala vysvětlit tak, že se v podstatě jedná o intersticiální zrna, která zřejmě krystalizují z taveniny. Tento předpoklad by souhlasil se studií chemické analýzy živců, kde bylo měřeno integrované složení dvouživcové matrix za účelem zjistit, zda tento chemismus odpovídá chemismu porfyrroklastu pertitu. Aby bylo možné porovnat chemismy těchto živců, bylo nutné se při měření integrovaných analýz vyhnout doménám se zrny vtoušeného křemene ve dvouživcové matrix. Pokud by totiž byla integrovanou analýzou měřena i tato intersticiální zrna ve dvouživcové matrix, mělo by to za následek přebytek Si a tento přebytek by mohl být pravděpodobně způsoben přínosem Si externě právě již zmíněnou taveninou ve vysokých tlacích.

Přítomnost taveniny by tedy dále nahrávala předpokladu o vzniku dvouživcové matrix, kdy by již zmíněný proces rozpadu živců uvedený v kapitolách výše spustila právě přítomnost taveniny, která byla na kontaktech s porfyroklasty ternárních živců. Tavenina reagovala s těmito porfyroklasty (popsáno v práci např. Norberg et al., 2013) a toto reagování taveniny s porfyroklastem živce by způsobovalo rozpouštění porfyroklastu ternárního živce a následnou precipitaci (krystalizaci) taveniny, tedy vznik dvouživcové matrix s již zmíněným intersticiálním křemenem. Pravděpodobně z tohoto důvodu je možné sledovat krystalizovanou taveninu přítomnou v doménách kliváže, a to kvůli její snadné migraci do těchto domén (White a Powell, 2002; Hasalová et al., 2008).

10. Závěr

Pozorováním deformační mikrostruktury granulitu Blanského lesa za použití kvantitativní mikrostrukturní analýzy a studováním křemenných zrn ve vztahu k jejich krystalografické orientaci bylo možné interpretovat pravděpodobný mechanismus, který vedl k rozdělování křemenných (destičkových) pásků, tzv. platten quartz. Dále bylo také možné pozorováním objasnit pravděpodobné rozpady živců v tomto zkoumaném felzickém granulitu, a to tak, že proces rozpadu porfyroklastů ternárního živce na jemnozrnnou dvouživcovou matrix interpretuji s přítomností taveniny v hornině a za vzniku kliváže ve stejný moment, jedná se tedy o synchronní události. Křemen v matrix v podstatě reprezentuje intersticiální zrna, která zřejmě krystalizují z taveniny, což potvrzuje jejich všesměrná krystalografická orientace a předpokládám, že tavenina snadno migrovala po hranicích zrn křemene do domén kliváže protínající křemenné pásky a následně pásky přerušovala, díky čemuž mohlo dojít k vytvoření tohoto konkrétního geometrického uspořádání křemenných zrn.

Přílohy

Tabulky 15 a 16 s chemickým složením živců vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže protínající křemenné pásy kliváže I. a kliváže II.

Tab. 15. Reprezentativní mikrosondové analýzy živců kliváže I. vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže.

Vzorek	Kliváž I.															
Minerál	Plagioklas								K-živec							
	Bodová analýza								Bodová analýza							
Analýza	10	15	16	17	21	22	1	2	3	8	11	14	20	23	26	28
SiO ₂	63,588	64,171	63,736	64,256	63,515	63,749	65,518	65,332	65,259	65,705	65,589	65,500	65,498	65,405	65,140	65,426
TiO ₂	0,015	0,018	0,015	0,022	0,000	0,017	0,024	0,031	0,002	0,031	0,047	0,003	0,023	0,018	0,012	0,000
Cr ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,000	0,002	0,031	0,000	0,000	0,015	0,000	0,022	0,000	0,000
Al ₂ O ₃	23,170	23,153	23,233	23,008	23,081	23,018	18,855	18,848	18,670	18,823	18,886	18,850	18,991	18,838	18,712	18,706
Fe ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,047	0,016	0,016	0,023	0,006	0,021	0,007	0,006	0,007
FeO	0,091	0,032	0,016	0,038	0,000	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
MnO	0,037	0,010	0,001	0,011	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,019	0,001	0,010	0,000	0,009	0,003
MgO	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,001	0,008	0,003	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000
CaO	4,511	4,454	4,408	4,312	4,533	4,485	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Na ₂ O	8,288	8,354	8,423	8,430	8,319	8,208	1,115	0,626	0,526	0,958	0,704	1,161	1,287	0,943	0,679	0,641
K ₂ O	0,234	0,173	0,178	0,183	0,208	0,248	15,904	16,627	16,861	16,110	16,527	15,790	15,550	16,328	16,607	16,792
Total	99,934	100,365	100,010	100,279	99,661	99,753	101,444	101,516	101,365	101,655	101,795	101,342	101,380	101,561	101,165	101,575
Si	2,833	2,847	2,835	2,852	2,836	2,847	2,972	2,969	2,971	2,977	2,971	2,973	2,970	2,965	2,969	2,970
Ti	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000
Cr	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
Al	1,217	1,211	1,218	1,204	1,215	1,212	1,008	1,010	1,002	1,005	1,009	1,009	1,015	1,007	1,005	1,001
Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺	0,003	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,215	0,212	0,210	0,205	0,217	0,215	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Na	0,716	0,719	0,726	0,725	0,720	0,711	0,098	0,055	0,046	0,084	0,062	0,102	0,113	0,083	0,060	0,056
K	0,013	0,010	0,010	0,010	0,012	0,014	0,920	0,964	0,979	0,931	0,955	0,914	0,900	0,944	0,965	0,972

Hodnoty jsou uvedeny v hm.%, která jsou přepočítána pomocí programu norm.

K-živec a plagioklas je přepočítán na 5 kationtů a 8 kyslíků.

Tab. 16. Mikrosondové analýzy živeců kliváže II. vyskytujících se ve dvouživcové matrix, která je přítomna v doménách kliváže.

Vzorek Minerál	Kliváž II.						
	Plagioklas			K-živec			
	Bodová analýza			Bodová analýza			
Analýza	2	4	7	1	3	6	8
SiO ₂	64,375	65,043	64,551	65,592	65,800	65,859	65,760
TiO ₂	0,000	0,006	0,000	0,029	0,043	0,019	0,049
Cr ₂ O ₃	0,012	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
Al ₂ O ₃	22,729	22,619	22,696	18,849	18,665	18,809	18,923
Fe ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,006	0,020	0,000	0,011
FeO	0,016	0,011	0,037	0,000	0,000	0,000	0,000
MnO	0,000	0,017	0,023	0,007	0,000	0,000	0,000
MgO	0,002	0,009	0,008	0,005	0,004	0,000	0,000
CaO	4,066	3,785	3,940	0,000	0,000	0,000	0,000
Na ₂ O	8,509	8,730	8,754	1,429	1,083	1,035	1,832
K ₂ O	0,160	0,214	0,154	15,276	15,978	15,974	14,772
Total	99,869	100,434	100,163	101,193	101,598	101,696	101,347
Si	2,868	2,878	2,862	2,979	2,982	2,982	2,975
Ti	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002
Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Al	1,193	1,180	1,186	1,009	0,997	1,004	1,009
Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
Fe ²⁺	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca	0,194	0,179	0,187	0,000	0,000	0,000	0,000
Na	0,735	0,749	0,753	0,126	0,095	0,091	0,161
K	0,009	0,012	0,009	0,885	0,924	0,923	0,853

Hodnoty jsou uvedeny v hm.%, která jsou přepočítána pomocí programu norm.

K-živec a plagioklas je přepočítaný na 5 kationtů a 8 kyslíků.

Tabulka 17 s chemickým složením bodových analýz zrn plagioklasu použitých během živcové termometrie pro vypočtení rovnovážných teplot pro koexistující zrna draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix kliváže I. a kliváže II.

Tab. 17. Mikrosondové analýzy s chemickým složením bodových analýz zrn plagioklasu použitých pro vypočtení rovnovážných teplot pro koexistující zrna draselného živce a plagioklasu ve dvouživcové matrix kliváže I. a kliváže II.

Minerál	Plagioklas						
	Bodová analýza						
Vzorek	Kliváž I.				Kliváž II.		
Analýza	4 plg	7 plg	12 plg	22 plg	2 plg	4 plg	7 plg
SiO ₂	63,401	63,811	63,934	63,749	64,375	65,043	64,551
TiO ₂	0,000	0,000	0,024	0,017	0,000	0,006	0,000
Cr ₂ O ₃	0,000	0,000	0,018	0,000	0,012	0,000	0,000
Al ₂ O ₃	23,439	23,058	22,972	23,018	22,729	22,619	22,696
Fe ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FeO	0,000	0,033	0,017	0,027	0,016	0,011	0,037
MnO	0,011	0,016	0,026	0,000	0,000	0,017	0,023
MgO	0,003	0,000	0,000	0,001	0,002	0,009	0,008
CaO	4,919	4,345	4,227	4,485	4,066	3,785	3,940
Na ₂ O	7,869	8,247	8,385	8,208	8,509	8,730	8,754
K ₂ O	0,284	0,305	0,237	0,248	0,160	0,214	0,154
Total	99,926	99,815	99,840	99,753	99,869	100,434	100,163
Si	2,832	2,847	2,850	2,847	2,868	2,878	2,862
Ti	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
Cr	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Al	1,234	1,213	1,207	1,212	1,193	1,180	1,186
Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001
Mn	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
Ca	0,235	0,208	0,202	0,215	0,194	0,179	0,187
Na	0,681	0,713	0,725	0,711	0,735	0,749	0,753
K	0,016	0,017	0,013	0,014	0,009	0,012	0,009

Hodnoty jsou uvedeny v hm. %, která jsou přepočítána pomocí programu norm.

K-živec a plagioklas je přepočítaný na 5 kationtů a 8 kyslíků.

Kvantitativní mikrostrukturní analýza – script pro analýzu v PolyLX – MATLAB™ toolbox (Lexa, 2003)

Načtení dat ve formátu .shp (shapefile)

- `g = shpread`

Škálování („scaling factor“ – ukázka na doméně mapy 1)

- `gn = gtrans2d(g,'scale',0.74906367)`

Distribuce velikosti zrn pro každou fázi (EAD – equal area diameter) a krabicové diagramy (boxplots)

- `size = get(gn, 'EAD');`
- `pboxplot(gn, 'EAD');`

Minimum, maximum, medián, průměr velikosti zrn jednotlivých fází

- `describe(gn)`

Tvarová přednostní orientace zrn (SPO zrn) a růžicové diagramy – ukázka na příkladu plagioklasu

- `qz = gn('Plg')`
- `gt1 = gorten2(qz);`
- `figure,prosew(gt1);`

Zobrazení map

- `figure, plot()`
- `legend off`

Tvarová přednostní orientace hranic zrn (SPO hranic zrn) a růžicové diagramy

- `b=bmake(gn)`
- `bb=bsmooth(b,'method','bezier','clean','renee');`

Primární kontakty mezi Kfs a Plg („původní“ matrix bez albitových lemů):

- `figure, prose(bb(btsel(bb,'Kfs-Plg','Plg-Plg lem')))`

Ostatní kontakty:

- `figure, prose(bb(btsel(bb,'Plg-Qz','Kfs-Qz','Plg lem-Qz')))`

- figure, prose(bb(btsel(bb,'Kfs-Kfs')))
- figure, prose(bb(btsel(bb,'Plg-Plg')))
- figure, prose(bb(btsel(bb,'Kfs-Plg lem','Plg-Plg lem')))
- figure, prose(bb(btsel(bb,'Qz-Qz')))

Surfor analýza

- [xx, pd] = gsurfor(bb(btsel(bb,'Kfs-Plg','Plg-Plg lem')));
- figure, pproj(pd)

min a max orientace

- [p,q]=min(sum(pd)), [l,k]=max(sum(pd))
- asp=l/p

Export jako vektorový grafický formát (Scalable Vector Graphics)

- svgwrite(gn);

Difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD) – script pro analýzu v MATLAB™ toolbox MTEX (Bachmann a Hielscher, 2005–2016)

Rotace snímků pomocí stupňů

- ebsdr = rotate(ebsd,rotation('axis',zvector,'angle',270*degree));

Korekce pomocí mad

- ebsdcor = ebsdr(ebsdr.mad<1.3);

Vynesení orientací (zobrazení map) – ukázka na mapě křemene

- figure, plot(ebsdcor('Quartz'),ebsdcor('Quartz').orientations,'micronBar','off')
- oM = ipdfHSVOrientationMapping(ebsdcor('Quartz'))
- figure, plot(oM)

Pseudometrie

Konstrukce hranic zrn definované velikostí misorientace 10°

- [grains ebsdcor.grainId ebsdcor.mis2mean] = calcGrains(ebsdcor,'angle',10*degree);

Odstranění neindexovaných polí - „not index“ („wild spikes“ - 1 pixel grains)

- ebsdcor(grains(grains.grainSize == 1)).phase = 0;

- `ebsdcor = ebsdcor('indexed');`

Rekonstrukce zrn bez neindexovaných polí („wild spikes“)

- `[grainscor ebsdcor.grainId ebsdcor.mis2mean]=calcGrains(ebsdcor,'angle',10*degree);`

Další omezení pseudosymetrií

Odstranění „twin boundaries“

- `gb_qtz = grainscor.boundary('Quartz','Quartz');`
- `gb_kf = grainscor.boundary('Orthoclase','Orthoclase');`
- `gb_pl = grainscor.boundary('Oligoclase','Oligoclase');`

Nalezení „twin boundaries“ křemenných hranic s rotací 60 ± 5 stupňů okolo c-osy a u všech živcových hranic s rotací 180 ± 5 stupňů okolo b-osy

- `rotq = rotation('axis',Miller(0,0,0,1,CS{4}),'angle',60*degree);`
- `indq = angle(gb_qtz.misorientation,rotq)<5*degree;`
- `rotk = rotation('axis',Miller(1,0,0,CS{2}),'angle',180*degree);`
- `indk = angle(gb_kf.misorientation,rotk)<5*degree;`
- `rotp = rotation('axis',Miller(0,1,0,CS{7}),'angle',180*degree);`
- `indp = angle(gb_pl.misorientation,rotp)<5*degree;`
- `rotp2 = rotation('axis',Miller(1,0,0,CS{7}),'angle',180*degree);`
- `indp2 = angle(gb_pl.misorientation,rotp2)<5*degree;`
- `twinBoundary=[];`
- `twinBoundary = [gb_qtz(indq) gb_kf(indk) gb_pl([indp, indp2])];`

Sloučení zrn oddělených „twin boundaries“

- `[mergedGrains,parentId] = merge(grainscor,twinBoundary,'calcMeanOrientation');`
- `mergedGrains=mergedGrains.smooth;`

Pólové diagramy – ukázka na křemenu

Separace křemenných zrn na zrna v pásku (Qz pásek) a na zrna v matrix (Qz matrix)

- `merged_q = mergedGrains('Quartz');`
- `g = mtexread(merged_q)`
- `plot(g)`
- `id = getsel;`
- `merged_q_pasek = merged_q(id);`
- `figure, plot(merged_q_pasek)`

Vynesení pólového diagramu

- figure
- plotPDF(merged_q_pasek('Quartz').meanOrientation,hq1,'antipodal','contourf','minmax');
x');
- hold on
- plotPDF(merged_q_pasek('Quartz').meanOrientation,hq1,'antipodal','MarkerSize',2,'MarkerColor','k');
- hold off

Seznam použité literatury

Babuška, V., Plomerová, J., 2001. Subcrustal lithosphere around the Saxothuringian–Moldanubian Suture Zone—a model derived from anisotropy of seismic wave velocities. *Tectonophysics*, 332, 185–199.

Babuška, V., Fiala, J., Plomerová, J., 2010. Bottom to top lithosphere structure and evolution of western Eger Rift (Central Europe). *International Journal of Earth Sciences*, 99, 891–907.

Babuška, V., Plomerová, J., 2013. Boundaries of mantle-lithosphere domains in the Bohemian Massif as extinct exhumation channels for high-pressure. *Gondwana Research*, 23, 973–987.

Bachmann, F., Hielscher, R., 2005–2016. MTEX – MATLAB toolbox for quantitative texture analysis. <http://mtex-toolbox.github.io/>.

Becker, H., 1997. Sm–Nd garnet ages and cooling history of high-temperature garnet peridotite massifs and high-pressure granulites from lower Austria. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127, 224–236.

Benisek, A., Dachs, E., Kroll, H., 2010. A ternary feldspar-mixing model based on calorimetric data: development and application. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 327–337.

Carswell, D. A., O'Brien, P. J., 1993. Thermobarometry and geotectonic significance of high-pressure granulites: examples from the Moldanubian zone of the Bohemian Massif in Lower Austria. *Journal Petrology*, 34, 427–459.

Condie, K. C., 1989. *Plate Tectonics and Crustal evolution*. Pergamon Press, New York.

Cooke, R. A., 2000. High-pressure/temperature metamorphism in the St. Leonhard Granulite Massif, Austria: evidence from intermediate pyroxene-bearing granulites. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 631–651.

Cooke, R. A., O'Brien, P. J., Carswell, D. A., 2000. Garnet zoning and the identification of equilibrium mineral compositions in high-pressure-temperature granulites from the Moldanubian Zone, Austria. *Journal of Metamorphic Geology*, 18, 551–570.

Dörr, W., Zulauf, G., 2010. Elevator tectonics and orogenic collapse of a Tibetan-style plateau in the European Variscides: the role of the Bohemian shear zone. *International Journal of Earth Sciences*, 99, 299–325.

Faryad, S. W., 2009. The Kutná Hora Complex (Moldanubian zone, Bohemian Massif): a composite of crustal and mantle rocks subducted to HP/UHP conditions. *Lithos*, 109, 193–208.

Faryad, S. W., Nahodilová, R., Dolejš, D., 2010. Incipient eclogite facies metamorphism in the Moldanubian granulites revealed by mineral inclusions in garnet. *Lithos*, 114, 54–69.

Faryad, S. W., Kachlík, V., Sláma, J., Hoinkes, G., 2015. Implication of corona formation in a metatroctolite to the granulite facies overprint of HP–UHP rocks in the Moldanubian Zone (Bohemian Massif). *Journal of Metamorphic Geology*, 33, 295–310.

Finger, F., Gerdes, A., Janoušek, V., René, M., Riegler, G., 2007. Resolving the Variscan evolution of the Moldanubian sector of the Bohemian Massif: the significance of the Bavarian and the Moravo–Moldanubian tectonometamorphic phases. *Journal of Geosciences*, 52, 9–28.

Franěk, J., Schulmann, K., Lexa, O., 2006. Kinematic and rheological model of exhumation of high pressure granulites in the Variscan orogenic root: example of the Blanský les granulite, Bohemian Massif, Czech Republic. *Mineralogy and Petrology*, 86, 253–276.

Franěk, J., Schulmann, K., Lexa, O., Tomek, Č., Edel, J. B., 2011a. Model of syn-convergent extrusion of orogenic lower crust in the core of the Variscan belt: implications for exhumation of high-pressure rocks in large hot orogens. *Journal of Metamorphic Geology*, 29, 53–78.

Franěk, J., Schulmann, K., Lexa, O., Ulrich, S., Štípská, P., Haloda, J., Týcová, P., 2011b. Origin of felsic granulite microstructure by heterogeneous decomposition of alkali feldspar and extreme weakening of orogenic lower crust during the Variscan orogeny. *Journal of Metamorphic Geology*, 29, 103–130.

Franke, W., 2000. The mid-European segment of the Variscides: tectonostratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution. Geological Society, London, Special Publications, 179, 35–61.

Fuhrman, M. L., Lindsley, I. B., 1988. Ternary-feldspar modelling and thermometry. *American Mineralogist*, 73, 201–212.

Gayk, T., Kleinschrodt, R., Langosch, A., Seidel, E., 1995. Quartz exsolution in clinopyroxenes of high-pressure granulites from the Münchberg massif. *European Journal of Mineralogy*, 7, 1217–1220.

Hasalová, P., Štípská, P., Powell, R., Schulmann, K., Janoušek, V., Lexa, O., 2008. Transforming mylonitic metagranite by open-system interactions during melt flow. *Journal of Metamorphic Geology*, 26, 55–80.

Cháb, J., Breiter, K., Fatka, O., Hladil, J., 2008. *Stručná geologie základu Českého masivu a jeho karbonského a permského pokryvu*. Česká geologická služba, Praha.

Janoušek, V., Holub, F. V., 2007. The causal link between HP-HT metamorphism and ultrapotassic magmatism in collisional orogens: case study from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Proceedings of the Geologists' Association*, 118, 75–86.

Jedlička, R., Faryad, S. W., Hauzenberger, C., 2015. Prograde metamorphic history of UHP granulites from the Moldanubian Zone (Bohemian Massif) revealed by major element and Y+REE zoning in garnets. *Journal of Petrology*, 56, 2069–2088.

Kodym, O., 1966. Moldanubicum, In: Svoboda J. (ed.), *Regional geology of Czechoslovakia*. I. Bohemian Massif. Československá akademie věd, Praha, 43–69.

Kodym, O., 1981. Vysvětlivky k základní geologické mapě ČSSR 1:25 000, list 32–212 Nová Ves. Ústřední ústav geologický, Praha.

Kodym, O., 1985. Vysvětlivky k základní geologické mapě ČSSR 1:25 000, list 32–214 Křemže. Ústřední ústav geologický, Praha.

Konopásek, J., Schulmann, K., 2005. Contrasting Early Carboniferous field geotherms: evidence for accretion of a thickened orogenic root and subducted Saxothuringian crust (Central European Variscides). *Journal of the Geological Society*, 162, 463–470.

Konopásek, J., Pilátová, E., Košler, J., Sláma, J., 2014. Zircon (re) crystallization during short-lived, high-P granulite facies metamorphism (Eger Complex, NW Bohemian Massif). *Journal of Metamorphic Geology*, 32, 885–902.

Kotková, J., 1993. Tectonometamorphic history of lower crust in the Bohemian Massif – example of north Bohemian granulites. *Česká geologická služba*, Praha, 1–42.

Kotková, J., Kröner, A., Todt, W., Fiala, J., 1996. Zircon dating of North Bohemian granulites, Czech Republic: further evidence for the Lower Carboniferous high-pressure event in the Bohemian Massif. *Geologische Rundschau*, 85, 154–161.

Kotková, J., 1998a. Garnet-bearing mafic granulites from the Lišov Granulite Massif. *Geolines*, 6, 37.

Kotková, J., 1998b. Garnet–pyroxene-bearing granulites from the Lišov Granulite Massif. *Česká geologická služba*, Praha, 1–24.

Kotková, J., Harley, S. L., 1999. Formation and evolution of high-pressure leucogranulites: experimental constraints and unresolved issues. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 24, 299–304.

Kotková, J., 2005. Granulity Českého masivu: jak, z čeho a kdy vznikaly? 2. sjezd České geologické společnosti, Slavonice. *Sborník abstraktů*, 60–61.

Kröner, A., O'Brien, P. J., Nemchin, A. A., Pidgeon, R. T., 2000. Zircon ages for high pressure granulites from South Bohemia, Czech Republic, and their connection to Carboniferous high temperature processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 138, 127–142.

Lexa, O., 2003. Numerical Approaches in Structural and Microstructural Analyses. Doktorská dizertační práce, Univerzita Karlova, Praha.

Maierová, P., Lexa, O., Jeřábek, P., Schulmann, K., Franěk, J., 2017. Computational study of deformation mechanisms and grain size evolution in granulites—implications for the rheology of the lower crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 466, 91–102.

Massonne, H. J., 2003. A comparison of the evolution of diamondiferous quartz-rich rocks from the Saxonian Erzgebirge and the Kokchetav Massif: are so-called diamondiferous gneisses magmatic rocks? *Earth and Planetary Science Letters*, 216, 347–364.

Matte, P., 1991. Accretionary history and crustal evolution of the Variscan belt in Western Europe. *Tectonophysics*, 196, 309–337.

Matte, P., 2001. The Variscan collage and orogeny (480–290 Ma) and the tectonic definition of the Armorica microplate: a review. *Terra Nova*, 13, 122–128.

Nahodilová, R., Faryad, S. W., Tropper, P., Konzett, J., 2008. High-to ultra-high pressure partial melting in orogenic belts: implications for the formation of felsic granulites from the Bohemian Massif. 33rd International Geological Congress, Oslo, Norway. General proceedings, 6–14.

Nahodilová, R., Faryad, S. W., Dolejš, D., Tropper, P., Konzett, J., 2011. High-pressure partial melting and melt loss in felsic granulites in the Kutná Hora complex, Bohemian Massif (Czech Republic). *Lithos*, 125, 641–658.

Nahodilová, R., Štípská, P., Powell, R., Košler, J., Racek, M., 2014. High-Ti muscovite as a prograde relict in high pressure granulites with metamorphic Devonian zircon ages (Běstvina granulite body, Bohemian Massif): consequences for the relamination model of subducted crust. *Gondwana Research*, 25, 630–648.

Norberg, N., Harlov, D., Neusser, G., Wirth, R., Rhede, D., Morales, L., 2013. Experimental development of patch perthite from synthetic cryptoperthite: microstructural evolution and chemical re-equilibration. *American Mineralogist*, 98, 1429–1441.

O'Brien, P. J., 1999. Asymmetric zoning profiles in garnet from HP–HT granulite and implications for volume and grain-boundary diffusion. *Mineralogical Magazine*, 63, 227–227.

Owen, J. V., Dostál, J., 1996. Contrasting corona structures in mafic granulite from the Blanský les complex, Bohemian Massif, Czech Republic. *The Canadian Mineralogist*, 34, 959–966.

Panozzo, R., 1987. Two-dimensional strain determination by the inverse SURFOR wheel. *Journal of Structural Geology*, 9, 115–119.

Racek, M., Štípská, P., Pitra, P., Schulmann, K., Lexa, O., 2006. Metamorphic record of burial and exhumation of orogenic lower and middle crust: a new tectonothermal model for the Drosendorf window (Bohemian Massif, Austria). *Mineralogy and Petrology*, 86, 221–251.

Racek, M., Štípská, P., Powell, R., 2008. Garnet–clinopyroxene intermediate granulites in the St. Leonhard massif of the Bohemian Massif: ultrahigh-temperature metamorphism at high pressure or not? *Journal of Metamorphic Geology*, 26, 253–271.

Romer, R. L., Rötzler, J., 2001. P–T–t evolution of ultrahigh-temperature granulites from the Saxon Granulite Massif, Germany. Part II: geochronology. *Journal of Petrology*, 42, 2015–2032.

Schulmann, K., Kröner, A., Hegner, E., Wendt, I., Konopásek, J., Lexa, O., Štípská, P., 2005. Chronological constraints on the pre-orogenic history, burial and exhumation of deep-seated rocks along the eastern margin of the Variscan orogen, Bohemian Massif, Czech Republic. *American Journal of Science*, 305, 407–448.

Schulmann, K., Konopásek, J., Janoušek, V., Lexa, O., Lardeaux, J. M., Edel, J. B., Štípská, P., Ulrich, S., 2009. An Andean type Palaeozoic convergence in the Bohemian Massif. *Comptes Rendus Geoscience*, 341, 266–286.

Schulmann, K., Lexa, O., Janoušek, V., Lardeaux, J. M., Edel, J. B., 2014. Anatomy of a diffuse cryptic suture zone: an example from the Bohemian Massif, European Variscides. *Geology*, 42, 275–278.

Suess, F. E., 1912. Die moravischen Fenster und ihre Beziehung zum Grundgebirge des Hohen Gesenke. *Denkschriften der Koeniglichen Akademie der Wissenschaft, Mathematik, Naturwissenschaft*, 83, 541–631.

Suk, M. 1981. Vysvětlivky ke geologické mapě ČSSR 1:25 000, list 32–222 Lišov. Ústřední ústav geologický, Praha.

Štípská, P., Schulmann, K., 1995. Inverted metamorphic zonation in a basement-derived nappe sequence, eastern margin of the Bohemian Massif. *Geological Journal*, 30, 385–413.

Štípská, P., Schulmann, K., Kröner, A., 2004. Vertical extrusion and middle crustal spreading of omphacite granulite: a model of syn-convergent exhumation (Bohemian Massif, Czech Republic). *Journal of Metamorphic Geology*, 22, 179–198.

Štípská, P., Powell, R., Racek, M., Lexa, O., 2014. Intermediate granulite produced by transformation of eclogite at a felsic granulite contact, in Blanský les, Bohemian Massif. *Journal of Metamorphic Geology*, 32, 347–370.

Štípská, P., Powell, R., Hacker, B. R., Holder, R., Kylander-Clark, A. R. C., 2016. Uncoupled U/Pb and REE response in zircon during the transformation of eclogite to mafic and intermediate granulite (Blanský les, Bohemian Massif). *Journal of Metamorphic Geology*, 34, 551–572.

Tajčmanová, L., Konopásek, J., Schulmann, K., 2006. Thermal evolution of the orogenic lower crust during exhumation within a thickened Moldanubian root of the Variscan belt of Central Europe. *Journal of Metamorphic Geology*, 24, 119–134.

Tajčmanová, L., Konopásek, J., Connolly, J. A., 2007. Diffusion-controlled development of silica-undersaturated domains in felsic granulites of the Bohemian Massif (Variscan belt of Central Europe). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153, 237–250.

Tajčmanová, L., Abart, R., Neusser, G., Rhede, D., 2011. Growth of plagioclase rims around metastable kyanite during decompression of high-pressure felsic granulites (Bohemian Massif). *Journal of Metamorphic Geology*, 29, 1003–1018.

Tajčmanová, L., Abart, R., Wirth, R., Habler, G., Rhede, D., 2012. Intracrystalline microstructures in alkali feldspars from fluid-deficient felsic granulites: a mineral chemical and TEM study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 164, 715–729.

Urban, M., 1992. Kinematics of the Variscan thrusting in the Eastern Moldanubicum (Bohemian Massif, Czechoslovakia): evidence from the Náměšť granulite massif. *Tectonophysics*, 201, 371–391.

Vrána, S., 1989. Perpotassic granulites from southern Bohemia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 103, 510–522.

Vrána, S., 1992. The Moldanubian Zone in southern Bohemia: Polyphase evolution of imbricated crustal and upper mantle segments. 1st International Conference on the Bohemian Massif, Prague. *Proceedings, Česká geologická služba, Praha*, 331–335.

Vrána, S., 1997. Geology and petrology of the Moldanubian zone. In: Vrána, S., Štědrá, V. (eds.), *Geological model of western Bohemia. Česká geologická služba, Praha*, 109–113.

Vrána, S., Štědrá, V., Fišera, M., 2005. Petrology and geochemistry of the Běstvína granulite body metamorphosed at eclogite facies conditions, Bohemian Massif. *Journal of the Czech Geological Society*, 50, 81–94.

Wen, S., Nekvasil, H., 1994. SOLVCALC: an interactive graphics program package for calculating the ternary feldspar solvus and for two-feldspar geothermometry. *Computers and Geosciences*, 20, 1025–1040.

Wendt, J. I., Kröner, A., Fiala, J., Todt, W., 1994. U–Pb zircon and Sm–Nd dating of Moldanubian HP/HT granulites from South Bohemia, Czech Republic. *Journal of the Geological Society*, 151, 83–90.

White, R. W., Powell, R., 2002. Melt loss and the preservation of granulite facies mineral assemblages. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 621–632.

Wilner, A. P., Rötzler, K., Maresch, W. V., 1997. Pressure–temperature and fluid evolution of quartzo–feldspathic metamorphic rocks with a relic high-pressure, granulite-facies history from the Central Erzgebirge (Saxony, Germany). *Journal of Petrology*, 38, 307–336.

Zack, T., Moraes, R., Kronz, A., 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148, 471–488.

Žák, J., Holub, F. V., Verner, K., 2005. Tectonic evolution of a continental magmatic arc from transpression in the upper crust to exhumation of mid-crustal orogenic root recorded by episodically emplaced plutons: the Central Bohemian Plutonic Complex (Bohemian Massif). *International Journal of Earth Sciences*, 94, 385–400.

Žák, J., Dragoun, F., Verner, K., Chlupáčová, M., Holub, F. V., Kachlík, V., 2009. Forearc deformation and strain partitioning during growth of a continental magmatic arc: the northwestern margin of the Central Bohemian Plutonic Complex, Bohemian Massif. *Tectonophysics*, 469, 93–111.